



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Metodología para el modelado numérico de una micro central de generación hidroeléctrica propulsada por un vórtice gravitacional de agua

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

Helio Heli Garcia Sandoval

Asesores:

Dr. Ing. Jorge Demetrio Reyes Salazar; Mgtr. Ing. Daniel Germán Camacho Asmad

Piura, junio 2021

A mis padres, gracias por su amor y apoyo en cada decisión que he tomado; a mis hermanos por su cariño; y a mí, por no dejar de perseguir mis sueños.



Resumen Analítico-Informativo

Metodología para el modelado numérico de una micro central de generación hidroeléctrica impulsada por un vórtice gravitacional de agua

Helio Heli Garcia Sandoval

Asesor(es): Dr. Ing. Jorge Demetrio Reyes Salazar; Mgtr. Ing. Daniel Germán Camacho Asmad

Tesis.

Ingeniero Civil

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, junio de 2021

Palabras claves: Vórtice gravitacional de agua/ micro centrales hidroeléctricas/ turbina vertical/ modelado numérico/ Ansys CFX.

Introducción: La necesidad de electricidad en comunidades remotas del Perú ha impulsado la búsqueda de nuevas formas de generación eléctrica locales. Dentro de las diversas opciones, el uso de micro centrales de vórtice gravitacional de agua es una alternativa innovadora, con grandes beneficios ambientales y capaz de producir hasta 10Kw, suficiente para las necesidades de este tipo de comunidades. El objetivo de esta tesis es realizar una modelación numérica de la micro central de vórtice de la comunidad de Kadagaya en Junín, mediante el uso del software Ansys CFX.

Metodología: En este trabajo se usaron datos de diseño y funcionamiento de la micro central de Kadagaya, así mismo se realizó una visita para examinar detalladamente la operación de esta y obtener datos para corroborar el modelo numérico. En cuanto a la simulación, se dividió en dos casos: el primero abarca el estudio de la formación del vórtice y el segundo el comportamiento del vórtice con la turbina acoplada en su centro.

Resultados: Los datos experimentales del flujo obtenidos en la visita a la micro central de vórtice de Kadagaya permitieron tener una idea de la magnitud de las velocidades que deberían obtenerse en la simulación numérica. Los resultados de la simulación numérica están dentro del rango esperado. El flujo según la simulación numérica es cualitativamente parecido al flujo observado en la mencionada central, así como al flujo observado en los modelos a menor escala de vórtices gravitacionales.

Conclusiones: Los resultados obtenidos en la simulación numérica de la micro central hidroeléctrica de Kadagaya (con capacidad de producción eléctrica de hasta 10 Kw a alturas de agua de 2m) permiten afirmar que la simulación numérica se puede utilizar para ahondar en el estudio y entendimiento de esta tecnología. Se ha establecido un procedimiento para simular el flujo de una micro central de vórtice gravitatorio. Habrá que afinar los valores de los diferentes parámetros en el software, así como considerar otros modelos de turbulencia para determinar si es posible lograr una modelación más fidedigna de este tipo de centrales.

Fecha de elaboración del resumen: 27 de agosto de 2020

Analytical-Informative Summary

Metodología para el modelado numérico de una micro central de generación hidroeléctrica impulsada por un vórtice gravitacional de agua

Helio Heli Garcia Sandoval

Asesor(es): Dr. Ing. Jorge Demetrio Reyes Salazar; Mgtr. Ing. Daniel Germán Camacho Asmad

Tesis.

Ingeniero Civil

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, junio de 2021

Keywords: Gravitational water vortex/ micro hydroelectric powerplant/ vertical turbine/ numerical modeling/ Ansys CFX.

Introduction: The need for electricity in remote communities in Peru has driven the search for new forms of local power generation. Among the various options, the micro gravitational vortex water plant is an innovative alternative with great environmental benefits and capable of producing up to 10Kw, enough for the needs of these types of communities. The objective of this thesis is to perform a numerical modeling of the vortex micro central of the Kadagaya community in Junín, through the use of Ansys CFX software.

Methodology: The design and operation data of the Kadagaya micro central were used in this work, and also a visit was made to detailly examine the operation of the plant and obtain data to corroborate the numerical model. The simulation was divided into two cases: the first includes the study of the formation of the vortex and the second the behavior of the vortex with the turbine attached to its center.

Results: The experimental flow data, acquired in the visit to the Kadagaya vortex micro hydroelectric power plant, gave us an idea of the magnitude of the speeds that should be obtained in the numerical simulation. The simulation results are within the expected range. The flow according to the numerical simulation is qualitatively similar to the flow observed in the aforementioned plant, as well as the flow observed in the smaller-scale models of gravitational vortices.

Conclusions: The results obtained in the numerical simulation of the Kadagaya micro hydroelectric power plant (with an electrical production capacity of up to 10 kW at 2m water heights) confirm that numerical simulation can be used to delve into the study and understanding of this technology. A procedure to simulate the flow of a gravitational vortex micro hydroelectric power plant has been established. Other values of the different parameters can be used in the software as well as other turbulence models to determine if it is possible to achieve a more reliable modeling of this type of plant.

Summary date: August 27th, 2020

Prefacio

La energía eléctrica es una necesidad fundamental y un pilar en el desarrollo de la sociedad; sin embargo, no todas las personas tienen acceso a este servicio debido a la dificultad de llevar la corriente de la red eléctrica principal a las zonas alejadas. Ante esta situación, se han puesto en marcha diversos proyectos de generación eléctrica locales para satisfacer la demanda de potencia eléctrica de pequeñas comunidades en las zonas rurales.

La búsqueda de una manera de generar electricidad para estas comunidades, sin descuidar los aspectos ambientales y de capacidad de generación ha derivado en diversas maneras de producir corriente eléctrica, una de las ideas más innovadoras es el uso de micro centrales hidroeléctricas propulsadas por vórtices gravitacionales de agua.

Las micro centrales de vórtice gravitacionales son capaces de producir hasta 10 kW de potencia, suficiente para una pequeña comunidad; y, trabajar con alturas de agua de hasta 2 m, la cual es una altura pequeña en comparación con la altura necesaria para otras formas de generación de energía hidroeléctrica. Otras ventajas, además de producir energía de una fuente renovable, son el hecho de que esta central no afecta la vida acuática, ya que permite el libre tránsito de los peces, y que ayuda al proceso de aeración del agua, oxigenándola.

En este trabajo se ha realizado una simulación de este tipo de centrales mediante *Computer Fluid Dynamics* (CFD), usando los parámetros de diseño y funcionamiento de una micro central ya existente, ubicada en la comunidad de Kadagaya en la región de Junín, Perú. Se espera que los resultados obtenidos en la simulación brinden datos interesantes sobre el comportamiento de este tipo de micro centrales de vórtice gravitacional de agua y sirvan de ayuda para futuras investigaciones relacionadas a este innovador sistema.

Me gustaría extender mi agradecimiento a los fundadores de la comunidad de Kadagaya, Vladimir y Julie; por permitirme conocer la micro central y brindarme toda su información y experiencia. También a mis asesores; el Mgtr. Daniel Camacho y el Dr. Jorge Reyes, por ser guías en cada etapa de esta investigación y apoyarme con sus valiosas enseñanzas y gran conocimiento. Al Departamento de Energía de la Universidad de Piura por concederme usar

sus *Workstations*, para la modelación. Y, finalmente, también extendiendo un agradecimiento especial al Dr. Raúl La Madrid por su voluntad de apoyo en la realización de la simulación y a la empresa HEGASA SAC que nos facilitó el alquiler de los equipos para la toma de datos de esta investigación.



Tabla de contenido

Introducción.....	1
Capítulo 1 Centrales de micro generación hidroeléctrica de vórtice gravitacional de agua.....	3
1.1. Generación de energía eléctrica.....	3
1.2. Fuentes de energía eléctrica renovables.....	5
1.3. Centrales de generación hidroeléctrica.....	7
1.3.1. Métodos para extraer energía eléctrica de fuentes hidráulicas.....	7
1.3.2. Clasificación de las centrales hidroeléctricas por su capacidad de generación.....	8
1.4. Turbinas hidráulicas.....	8
1.4.1. Turbinas Pelton.....	9
1.4.2. Turbinas Francis.....	10
1.4.3. Turbinas Kaplan.....	10
1.5. Vórtice gravitacional de agua.....	11
1.5.1. Formación de los vórtices gravitacionales.....	12
1.5.2. Clasificación de los vórtices.....	13
1.5.3. Tipos de vórtices gravitacionales.....	14
1.6. Centrales de micro generación hidroeléctrica de vórtice gravitacional de agua.....	15
1.6.1. Características de una central de micro generación hidroeléctrica de vórtice gravitacional de agua.....	16
1.6.2. Ventajas de las centrales de micro generación hidroeléctrica de vórtice gravitacional de agua.....	17
Capítulo 2 Modelación numérica.....	19
2.1. Ecuaciones básicas de la mecánica de fluidos.....	19

2.1.1. Ecuación de la conservación de la masa	19
2.1.2. Ecuación de la cantidad de movimiento o momento angular	19
2.1.3. Ecuación de la conservación de la energía.....	20
2.2. Ecuaciones de Navier Stokes.....	20
2.3. Dinámica de fluidos computacional (CFD)	21
2.4. Procesos de cálculo en CFD	22
2.5. Modelo de turbulencia k-épsilon ($k-\epsilon$)	23
2.6. Modelo multifásico VOF.....	24

Capítulo 3 Modelación de la central de micro generación hidroeléctrica de vórtice

gravitacional de agua con Ansys CFX.....	27
3.1. Problema de estudio.....	27
3.2. Caso 1: Estudio de la formación del vórtice en la estructura hidráulica.....	27
3.2.1. Pre-procesamiento del caso 1.....	27
3.2.2. Procesamiento del caso 1	35
3.3. Incorporación de la turbina a la estructura hidráulica.....	37
3.3.1. Pre-procesamiento del caso 2.....	37
3.3.2. Procesamiento del caso 2.....	44

Capítulo 4 Artículo científico: Metodología para el modelado numérico de una micro central de generación hidroeléctrica impulsada por un vórtice gravitacional de agua.....

Conclusiones	61
Recomendaciones	63
Referencias bibliográficas.....	65

Lista de tablas

Tabla 1.	Fuentes de generación eléctrica.	3
Tabla 2.	Clasificación de centrales hidroeléctricas.	8
Tabla 3.	Nombre de las caras del dominio y ubicación.	29
Tabla 4.	Datos de la malla.	30
Tabla 5.	Características de los elementos.	30
Tabla 6.	Listado de expresiones.	31
Tabla 7.	Configuración de las propiedades del fluido.	31
Tabla 8.	Condición de frontera en el Inlet.	32
Tabla 9.	Condición de frontera en el Outlet.	33
Tabla 10.	Condición de frontera del Ambient.	33
Tabla 11.	Condición de frontera de las <i>Walls</i>	33
Tabla 12.	Configuración del análisis.	34
Tabla 13.	Configuración del solucionador.	35
Tabla 14.	Configuración del control de salida.	35
Tabla 15.	Configuración de la ejecución del procesamiento.	36
Tabla 16.	Nombre de las caras del dominio “Tanque” y ubicación.	39
Tabla 17.	Nombre de las caras del dominio “Turbina” y ubicación.	40
Tabla 18.	Datos de la segunda malla.	41
Tabla 19.	Características de los elementos de la segunda malla.	41
Tabla 20.	Configuración general de las propiedades del fluido y dominios.	42
Tabla 21.	Condición de frontera de la turbina.	43
Tabla 22.	Configuración de la interfaz BOT.	43
Tabla 23.	Configuración de la interfaz MED.	44
Tabla 24.	Configuración de la interfaz UP.	44

Lista de figuras

Figura 1.	Fuentes de generación de electricidad en Perú (1995-2015).	5
Figura 2.	Evolución de la producción de electricidad del mercado peruano.....	5
Figura 3.	Fuentes de energía renovables.	6
Figura 4.	Central hidroeléctrica.....	7
Figura 5.	Rangos de uso de turbinas hidráulicas.	9
Figura 6.	Turbina Pelton.....	10
Figura 7.	Turbina Francis.....	10
Figura 8.	Turbina Kaplan.	11
Figura 9.	Formación de vórtices en tuberías de centrales hidroeléctricas.....	11
Figura 10.	Vórtice estable generado en un modelo a menor escala construido por el autor.	12
Figura 11.	Vórtice débil.....	13
Figura 12.	Vórtice Fuerte	14
Figura 13.	Tipos de vórtices 1-6.....	15
Figura 14.	Vórtice tipo 7	15
Figura 15.	Micro central de vórtice gravitacional en Ober-Grafendorf.	16
Figura 16.	Relación de la dinámica de fluidos computacional con otras ciencias	21
Figura 17.	Estudio de la dinámica de fluidos computacional.....	22
Figura 18.	Representación numérica de una rápida de agua	25
Figura 19.	Geometría de la micro central hidroeléctrica de Kadagaya.	28
Figura 20.	Geometría de la micro central de Kadagaya llevada a Ansys.	28
Figura 21.	Mallado del dominio.	30
Figura 22.	Superficies del dominio donde se especifican condiciones de frontera.....	34
Figura 23.	Residuales del caso 1.	36
Figura 24.	Desbalances caso 1.....	37
Figura 25.	Geometría completa de la micro central hidroeléctrica de Kadagaya.	38

Figura 26.	(a) y (b) Detalles de la turbina vertical.	38
Figura 27.	Geometría completa de la micro central hidroeléctrica de Kadagaya en Ansys.....	39
Figura 28.	Ubicación de las interfases.....	40
Figura 29.	Mallado de ambos dominios.	41
Figura 30.	Residuales del Segundo caso de simulación	45
Figura 31.	Desbalances del dominio del tanque.....	46
Figura 32.	Desbalances del dominio de la turbina.	46



Introducción

Las micro centrales hidroeléctricas de vórtice gravitacional de agua son una nueva e innovadora manera de producir suficiente potencia eléctrica para pequeñas comunidades en zonas alejadas. Desde su invención en el año 2006 por el ingeniero austriaco Franz Zotlöterer, se han iniciado diversas investigaciones sobre el funcionamiento y optimización de estas centrales.

Lo que más llama la atención de esta tecnología es su capacidad de producir electricidad con alturas de agua relativamente pequeñas (hasta 2 m), también los efectos positivos que tiene en el medio ambiente ya que fomenta la aireación del agua y es amigable con los ecosistemas en donde se instala, debido a que permite el paso de la vida acuática sin dañarla.

El objetivo de esta investigación fue realizar una simulación numérica del comportamiento de las micro centrales de este tipo, estableciendo una metodología para realizar esta tarea. El software de dinámica de fluidos computacional utilizado en la simulación fue el Ansys CFX. La geometría, así como algunas condiciones de contorno utilizadas en la simulación corresponden a la micro central existente en la comunidad de Kadagaya en Junín, Perú, de la cual se ha simulado el vórtice gravitacional que se forma dentro de la micro central, así como la interacción del vórtice con la turbina vertical encargada de la generación de energía.

Además, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Presentar una simulación computacional de la micro central hidroeléctrica que sirva como referencia para estudios posteriores.
- Adaptar las herramientas del Software Ansys CFX 19.1 al modelamiento del fenómeno hidráulico.
- Contrastar los resultados numéricos obtenidos con los del modelo a escala real ubicado en la comunidad de Kadagaya, Junín.

Por último, es importante mencionar que esta tesis es complementaria al artículo científico titulado: “Metodología para el modelado numérico de una micro central de generación hidroeléctrica propulsada por un vórtice gravitacional de agua” que fue expuesto en

el 14° Congreso Interamericano de Computación Aplicada a la Industria de Procesos, CAIP 2019, realizado en la ciudad de Lima, Perú, del 21 al 24 de octubre de 2019. El autor de esta investigación formó parte de la elaboración del mencionado artículo científico y desarrolló la presente tesis para detallar la investigación realizada; dicho artículo está presente en el capítulo 4 de este trabajo.



Capítulo 1

Centrales de micro generación hidroeléctrica de vórtice gravitacional de agua

1.1. Generación de energía eléctrica

El avance de la tecnología y las nuevas invenciones han impulsado crecimiento en el consumo de electricidad, principalmente en los países de mayor capacidad industrial y crecimiento poblacional.

Acceder al servicio eléctrico es tan sencillo que se suele olvidar las etapas de generación, transporte y transformación de la corriente, que permiten que la electricidad llegue a las casas u oficinas.

Existen diversas formas de obtener la energía eléctrica, desde aprovechar directamente los recursos naturales hasta usar complejos procesos industriales; en este sentido, las principales fuentes de transformación de energía a energía eléctrica son las mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1. Fuentes de generación eléctrica.

Fuente	Descripción	Ilustración
Energía potencial	Mediante el uso de estructuras contenedoras tales como: reservorios o represas, se aprovecha la diferencia de altura de agua para generar corriente eléctrica.	 Fuente: EnergyFive, 2018.
Energía cinética	La energía del movimiento se aprovecha de fuentes como el viento y agua, las corrientes de circulación de ambos fluidos se utilizan para la generación de electricidad.	 Fuente: Layton & Gleim, 2017.

Fuente	Descripción	Ilustración
Energía térmica	La energía térmica producto del quemado de combustibles fósiles se emplea para generar electricidad mediante el uso de generadores eléctricos.	 <p data-bbox="1018 465 1259 488">Fuente: Tranter, 2019.</p>
Energía nuclear	Empleando un reactor se aprovecha la reacción nuclear del plutonio y uranio, el calor liberado durante las reacciones nucleares se emplea para generar energía eléctrica.	 <p data-bbox="995 772 1278 795">Fuente: Publimetro, 2014.</p>
Energía solar	A través de paneles solares, se aprovecha la energía producto de la radiación solar, la cual se almacena en forma de electricidad en baterías.	 <p data-bbox="1007 1052 1270 1075">Fuente: Indiamart, 2016</p>

Fuente: Elaboración propia.

La producción a gran escala de energía eléctrica toma lugar en las llamadas centrales de generación eléctrica, las cuales se encargan de transformar las ya mencionadas fuentes de energías en electricidad.

De acuerdo con los datos obtenidos por Tamayo, Salvador, Vásquez, & Vilches (2016), miembros del directorio de Osinergmin (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería), en el Perú se consumieron 48 278 GWh en el año 2015 y de acuerdo con el Ministerio de Energía y Minas del Perú (2020), en el año 2019 la cifra aumentó a 56 967 GWh.

En el Perú, para la generación de electricidad se usa preponderantemente las energías de tipo hidráulica (potencial), térmica, solar y eólica. Tamayo, Salvador, Vásquez & Vilches (2016) muestran también un gráfico con los porcentajes de producción de electricidad según las fuentes en los años 1995 y 2015 (Figura 1). También se aprecia que la energía hidráulica siempre ha representado un gran porcentaje de la energía producida en el Perú. En el caso de la energía térmica, su auge es consecuencia -afirman Tamayo et al- del descubrimiento del gas natural de Camisea, así, a partir del año 2005, la generación termoeléctrica paso de un 26.2% hasta un 47.6% en el 2015.

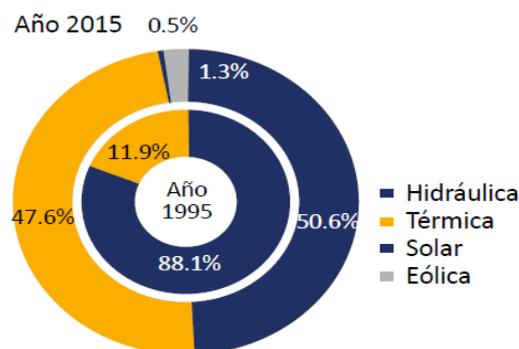


Figura 1. Fuentes de generación de electricidad en Perú (1995-2015).
Fuente: Tamayo et al., 2016.

Cabe resaltar que, del total de energía eléctrica producida, más del 95% es a través del SEIN (Sistema Eléctrico Interconectado Nacional), mientras que la producción de sistemas aislados de este ha pasado de un 5% en 1995 a apenas un 1% en 2015. La Figura 2 muestra cómo ha evolucionado el porcentaje de energía producido por el SEIN y por sistemas aislados.

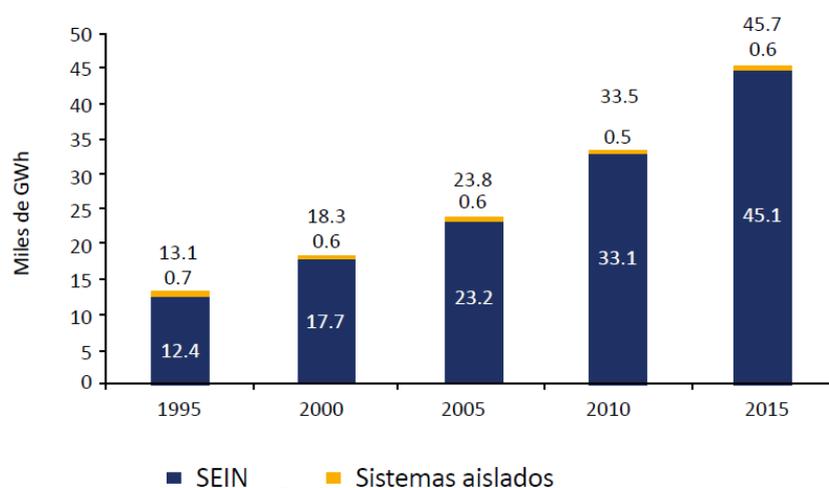


Figura 2. Evolución de la producción de electricidad del mercado peruano.
Fuente: Tamayo et al., 2016.

Ante esta situación, se debe recalcar que según Osinergmin el gobierno del Perú tiene como meta llegar al 2040 con una red eléctrica diversificada, con un aporte importante de uso de energías renovables, mínimo impacto ambiental y bajo nivel de emisiones de carbono en un marco de desarrollo sostenible.

1.2. Fuentes de energía eléctrica renovables

El término “energías renovables” se ha vuelto muy popular en las últimas décadas, generalmente se tiene una vaga idea sobre el tema, pero pocas personas pueden definir claramente qué son. Al investigar se pueden encontrar diversos enunciados, entre los que destacan los siguientes:

Para Jarabo, Perez, Elortegui, Fernandez, & Macias (1988) las fuentes de energía renovables son aquellas con origen en el flujo de energía que la tierra recibe continuamente y cuyo origen se encuentra en el sol.

Por otro lado Kaltschmitt, Streicher, & Wiese (2007) complementan la noción anterior, incluyendo como origen de las energía renovables -además el sol- el movimiento y gravedad de los planetas, y la energía almacenada en el interior de la tierra.

Finalmente Tamayo et al. (2016) agregan que dichas fuentes renovables son esencialmente inagotables en una escala de tiempo humana.

En la Figura 3. Se describen las diversas fuentes de energía renovable.



Figura 3. Fuentes de energía renovables.
Fuente: Tamayo et al., 2016.

De esta manera, la energía que se capta directamente de los rayos solares se denomina energía solar, la cual se suele almacenar en bancos de baterías para su distribución.

Por otro lado, la presencia de radiación solar en la atmósfera calienta las masas de aire, que adquieren movimiento por las diferentes temperaturas, a esto se le suma el efecto de giro de la tierra, convergiendo estas causas en la generación de corrientes de viento de las cuales se obtiene posteriormente la energía eólica.

La energía de la biomasa o bioenergía tiene su primer eslabón en las plantas que almacenan la energía solar como energía química.

Las fuentes geotérmicas aprovechan la energía del interior de la tierra, que calienta las masas de agua del subsuelo y provocan gases a presión, los cuales se aprovechan para generar corriente eléctrica.

Finalmente, debido a que la radiación solar calienta también las masas de agua de océanos y lagos para dar lugar al ciclo hidrológico del agua, se puede aseverar que la energía hidráulica también es una fuente de energía renovable de origen solar.

Todas las energías renovables mencionadas, son ampliamente usadas para la generación de energía eléctrica, siendo las centrales hidroeléctricas, eólicas y solares las más empleadas.

1.3. Centrales de generación hidroeléctrica

Debido a la influencia de la gravedad, los flujos de agua tales como: arroyos o ríos, se mueven de un punto geodésico alto a uno inferior. En ambas ubicaciones -señala Kaltschmitt et al. (2007)- el agua se caracteriza por tener cierta energía potencial así como cinética, las cuales son diferentes de un lugar a otro. Por tanto, una central de generación hidroeléctrica puede definirse como el lugar donde la energía hidráulica (en forma de energía potencial o cinética) es transformada en energía eléctrica, dicha central se ha de ubicar en las zonas donde el recurso hídrico sea abundante y de fácil captación.

1.3.1. Métodos para extraer energía eléctrica de fuentes hidráulicas

Muñoz-Hernandez, Mansoor, & Jones (2013) mencionan que para poder extraer la energía del agua se suele seguir el siguiente procedimiento:

- Llevar el agua de un río a un canal artificial.
- Almacenar los volúmenes de agua para mantener cierta altura y controlar el flujo de salida.
- Usar una máquina para convertir la energía del agua en energía mecánica de rotación.
- Controlar el sistema de ingreso de flujo y potencia de salida mecánica,

En la Figura 4 se muestra una represa (estructura hidráulica que permite almacenar el agua y controlar su salida al exterior). En el interior de dicha estructura, existe un cuarto de máquinas en el que se lleva a cabo la transformación de energía.



Figura 4. Central hidroeléctrica.
Fuente: Powergenadvancement (2016).

Las centrales hidroeléctricas varían en tamaño de acuerdo con su capacidad de producción, desde gigantes represas hasta pequeñas centrales de río.

1.3.2. Clasificación de las centrales hidroeléctricas por su capacidad de generación

De acuerdo con la Oficina de Eficiencia Energética y Energías Renovables del Departamento de Energía de Estados Unidos (EERE, 2017) se puede clasificar a las centrales hidroeléctricas por su capacidad de generación de la siguiente manera (Tabla 2):

Tabla 2. Clasificación de centrales hidroeléctricas.

Tipo	Ilustración
<p><i>Grandes centrales hidroeléctricas:</i> Instalaciones con capacidad de producir más de 30 (MW). Un ejemplo es la represa de las Tres Gargantas de China, capaz de generar hasta 22 500 MW</p>	 <p>Represa de las Tres Gargantas en China Fuente: Revista Energía (2016).</p>
<p><i>Pequeñas centrales hidroeléctricas:</i> Centrales que generan hasta 10 (MW) de potencia. Tal es el caso de la Central hidroeléctrica de Poechos II, la cual genera hasta 10 MW.</p>	 <p>Central hidroeléctrica de Poechos II Fuente: Osinerg (2012).</p>
<p><i>Micro centrales hidroeléctricas:</i> Una micro central puede producir hasta 100 kilowatts (KW) de potencia, la cual puede ser suficiente para suplir las necesidades eléctricas de una casa, un rancho, una villa o una pequeña comunidad. Como ejemplo está la micro central con turbina de Arquímedes, que se ubica en Londres y genera hasta 8.5 KW.</p>	 <p>Micro central de Moden Hall Park Fuente: Pinterest (2012).</p>

Fuente: Elaboración propia.

1.4. Turbinas hidráulicas

La definición más simple y precisa de lo que es una turbina la brinda Juárez (1992), quien indica que las turbinas hidráulicas son máquinas que transforman la energía cinética o potencial del agua en movimiento giratorio.

De acuerdo con el autor, las turbinas hidráulicas se clasifican en dos grandes grupos:

- Turbinas de acción: aprovechan la energía cinética del agua. Las más comunes son las siguientes: Pelton, Turgo y Crossflow.
- Turbinas de reacción: utilizan la energía potencial del agua, dentro de este grupo se encuentran las turbinas Kaplan, de hélice, Francis, entre otras.

Dentro de los dos grupos mencionados anteriormente se pueden distinguir los diferentes tipos de turbinas existentes, la Figura 5 muestra que tipo de turbina es adecuada para cada caudal y altura determinados de agua.

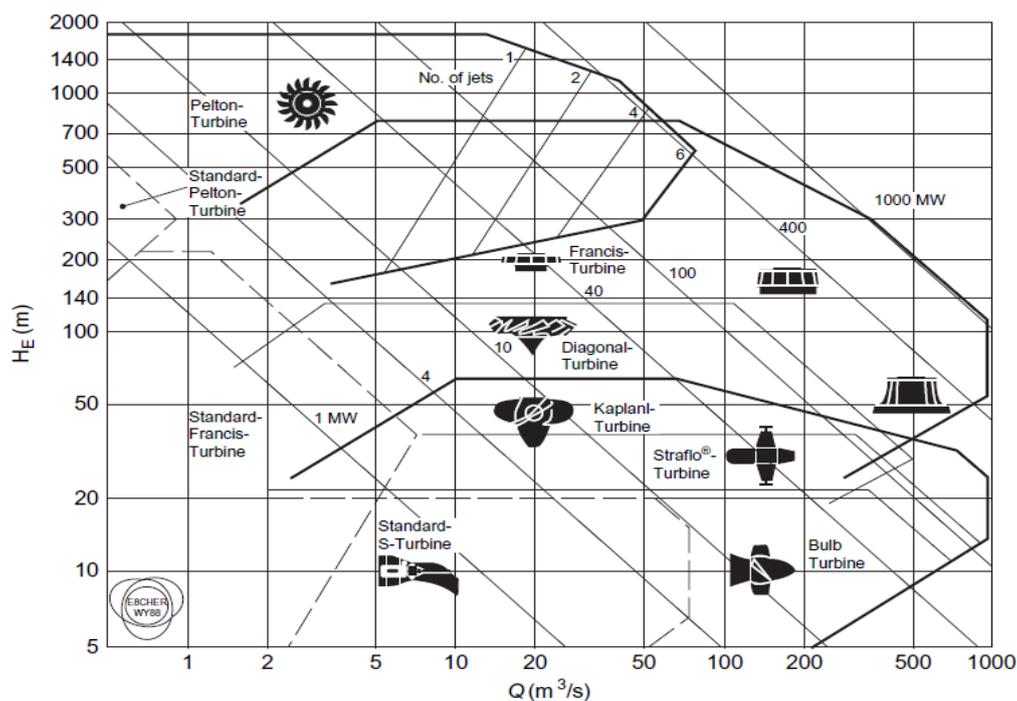


Figura 5. Rangos de uso de turbinas hidráulicas.

Fuente: Dixon & Hall (2014).

Dixon & Hall (2014), describen brevemente los tipos de turbina más comunes.

1.4.1. Turbinas Pelton

Se caracterizan por su elevada eficiencia, se emplean en lugares donde se dispone de grandes alturas de agua. Actualmente es la turbina de impulso o activa de uso más común. Geométricamente, su rotor consiste en un disco circular con un número de palas conocidas como cucharas distribuidas en la periferia, dichas palas son impulsadas por chorros de agua a gran velocidad. La Figura 6 muestra este tipo de turbinas.



Figura 6. Turbina Pelton.
Fuente: Voith Hydro (2016).

1.4.2. Turbinas Francis

Este tipo de turbinas generalmente tienen eje vertical y están acompañadas de una coraza en forma de caracol, dicha coraza permite una entrada radial del agua y también la direcciona, de esta manera, se mantiene una velocidad constante en el giro de la turbina. Como se observa en la Figura 5 este tipo de turbinas se usa para alturas de agua medias y caudales intermedios. La Figura 7 muestra la forma de este tipo de turbinas.



Figura 7. Turbina Francis
Fuente: SavRee 3D (2019).

1.4.3. Turbinas Kaplan

Las turbinas de este tipo suelen trabajar con alturas de agua bastante más bajas en comparación con las turbinas de tipo Francis, para compensar esto, las turbinas Kaplan trabajan con flujos volumétricos más elevados. Suelen tener una coraza que al igual que en la Francis, dirige el flujo. La Figura 8 presenta esta turbina.



Figura 8. Turbina Kaplan.
Fuente: Learning Engineering (2013).

1.5. Vórtice gravitacional de agua

Los vórtices gravitacionales formados en el agua son fenómenos que ocurren a menudo en la naturaleza y hasta en los hogares, vistos como simples remolinos pueden pasar desapercibidos e incluso ser motivo de juego para algunos niños en las bañeras o lavatorios. Sin embargo, su estudio empezó relativamente tarde y aún no se comprenden totalmente.

A inicios del siglo 20, en el campo de la ingeniería hidráulica se les prestó especial atención debido a que se notó la formación de vórtices en las tomas de agua de las centrales hidroeléctricas, la principal consecuencia de esto -menciona Möller (2013)- es la reducción de la eficiencia de las turbinas y la variación del caudal en la tubería forzada, todo debido al ingreso de aire fomentado por el vórtice. La Figura 9 esquematiza esta situación.

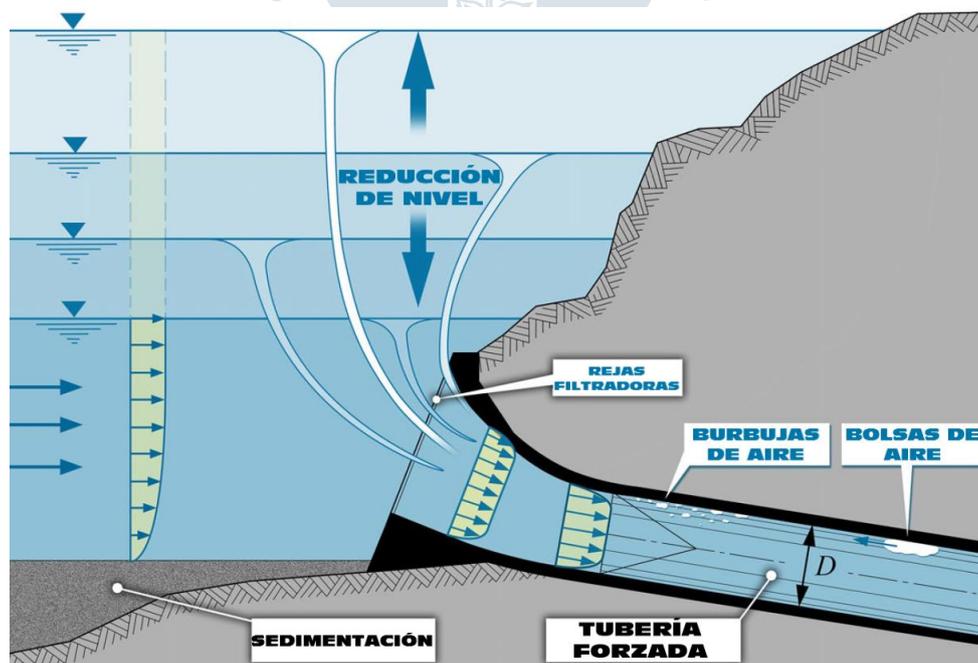


Figura 9. Formación de vórtices en tuberías de centrales hidroeléctricas.
Fuente: Möller, 2013.

A pesar de los avances que se han realizado en la mecánica de fluidos aún no existe una definición concreta de lo que es un vórtice. Mulligan (2015) menciona diversas definiciones de vórtice; una de las más destacadas, es la que lo describe como una estructura autoorganizada de fluido en movimiento, a la que la naturaleza prefiere antes que el caos.

En el presente trabajo se considera la definición de vórtice mencionada por Mulligan (2015), la cual describe a un vórtice como el movimiento rotativo de una multitud de partículas de materia alrededor de un centro común. En este estudio, el vórtice estará formado por masas de agua.

1.5.1. Formación de los vórtices gravitacionales

La existencia de un vórtice es consecuencia del principio de conservación del momento angular, sin embargo, para su formación es necesario que exista un pre-remolino (ver Mulligan, 2015, p.31) el cual puede ser producido como consecuencia de:

- El efecto Coriolis sobre las masas de agua debido a la rotación de la tierra.
- La variación del campo de velocidades del agua.
- Los efectos de la geometría por la que circula el agua.

Cabe destacar que la presencia de vórtices gravitacionales en la naturaleza es frecuente, pero su duración es corta debido a que mantener la estructura vorticial requiere una fuga de flujo, no obstante, podemos lograr que exista un vórtice estable si logramos una geometría que facilite su formación, mediante encapsulamiento, y que permita una salida de flujo a través de un orificio para que se mantenga estable. Este es el caso del vórtice mostrado en la Figura 10.

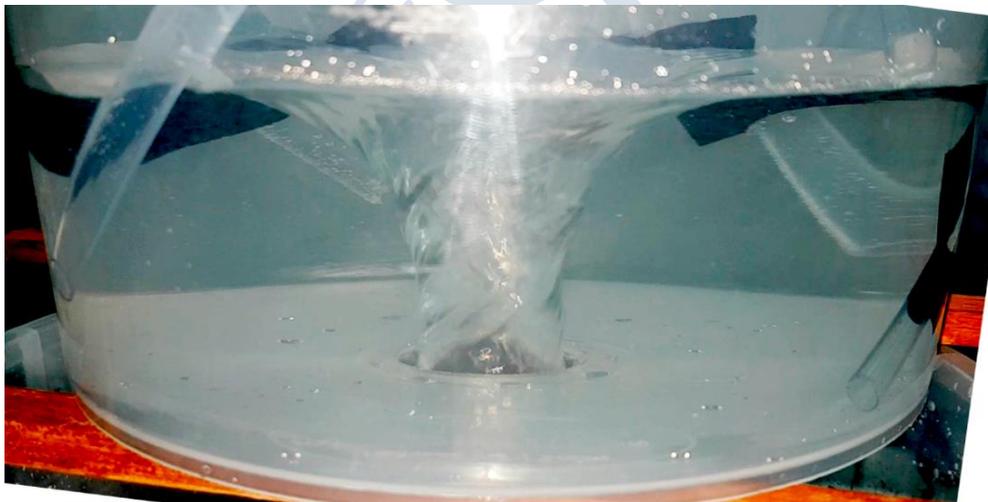


Figura 10. Vórtice estable generado en un modelo a menor escala construido por el autor.
Fuente: Elaboración propia

1.5.2. Clasificación de los vórtices

Según Mulligan (2015) los vórtices gravitacionales se pueden clasificar en dos categorías:

1.5.2.1. Vórtices débiles

Tienden a existir como inestabilidades en los flujos que exhiben características transitorias, dicha inestabilidad se manifiesta al no formarse un núcleo de aire que alcance la sección de salida. En los vórtices débiles predomina la descarga axial, esto porque la ausencia del centro de aire permite que el agua discurra por la mayoría del área de escape con facilidad. Como se mencionó anteriormente este tipo de vórtices suele ser un problema en las tomas de agua de las grandes centrales hidroeléctricas. Ver Figura 11.

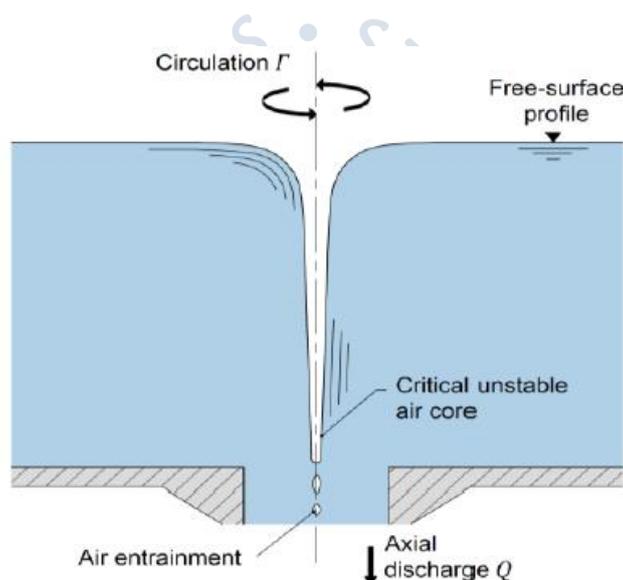


Figura 11. Vórtice débil
Fuente: Mulligan, 2015.

1.5.2.2. Vórtices fuertes

Por otro lado, los vórtices fuertes, son aquellos cuyo centro de aire está completamente formado gracias a que la fuerza de circulación del agua lo permite y por lo tanto alcanza la sección de salida, lo que conlleva a una mejor estabilidad de la estructura vorticial y también al menor gasto de flujo, debido a que el orificio de salida tiene un porcentaje significativo ocupado por el centro de aire, de esta manera el agua que discurre tiene menor área por la cual salir. Ver Figura 12.

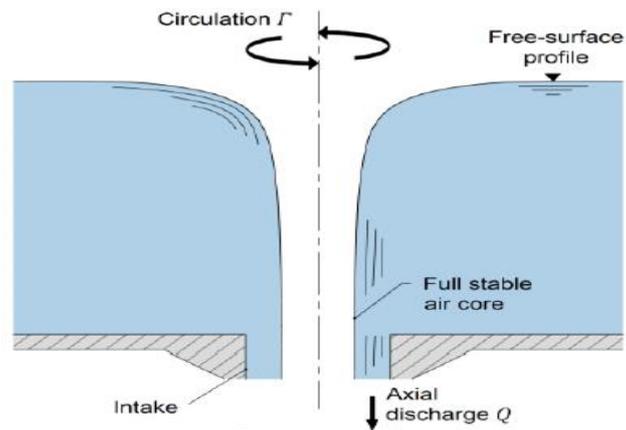
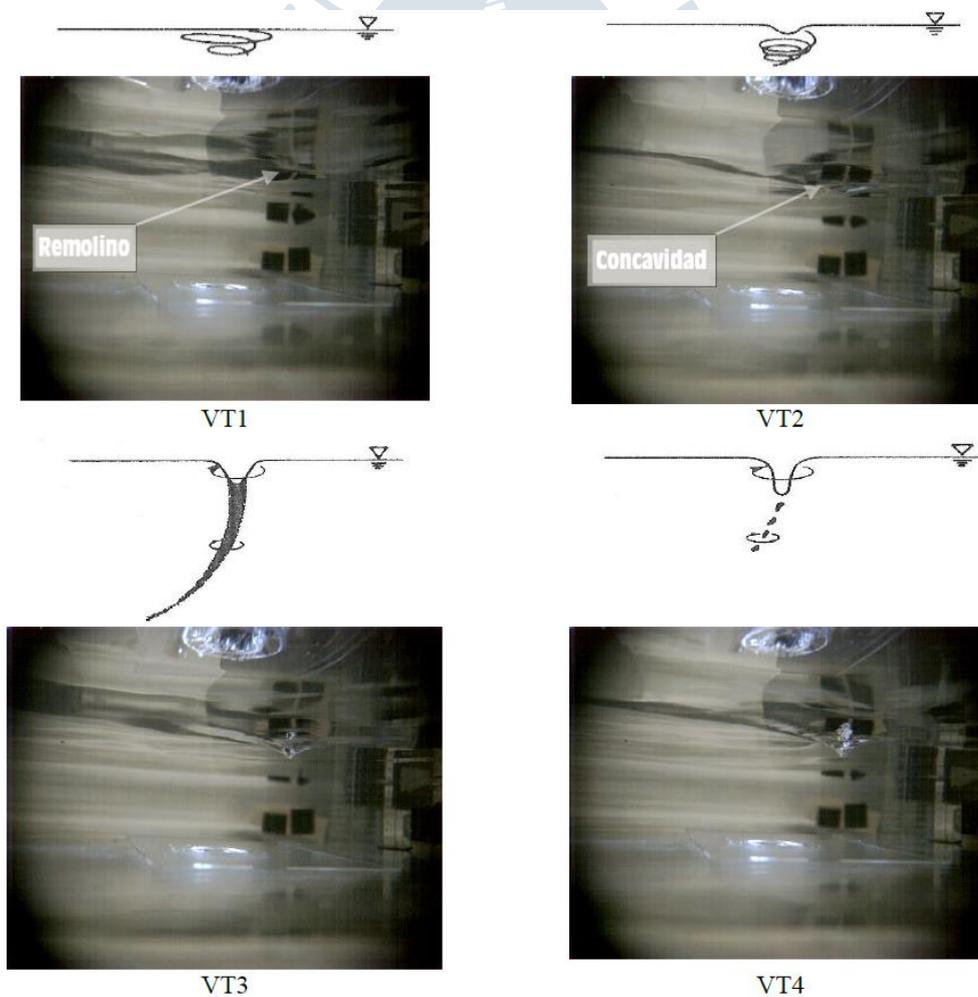


Figura 12. Vórtice Fuerte
Fuente: Mulligan, 2015.

1.5.3. Tipos de vórtices gravitacionales

De acuerdo con el nivel de formación que poseen, Mulligan (2015) propone 7 tipos de vórtices, los cuales se ilustran en la Figura 13 y Figura 14.



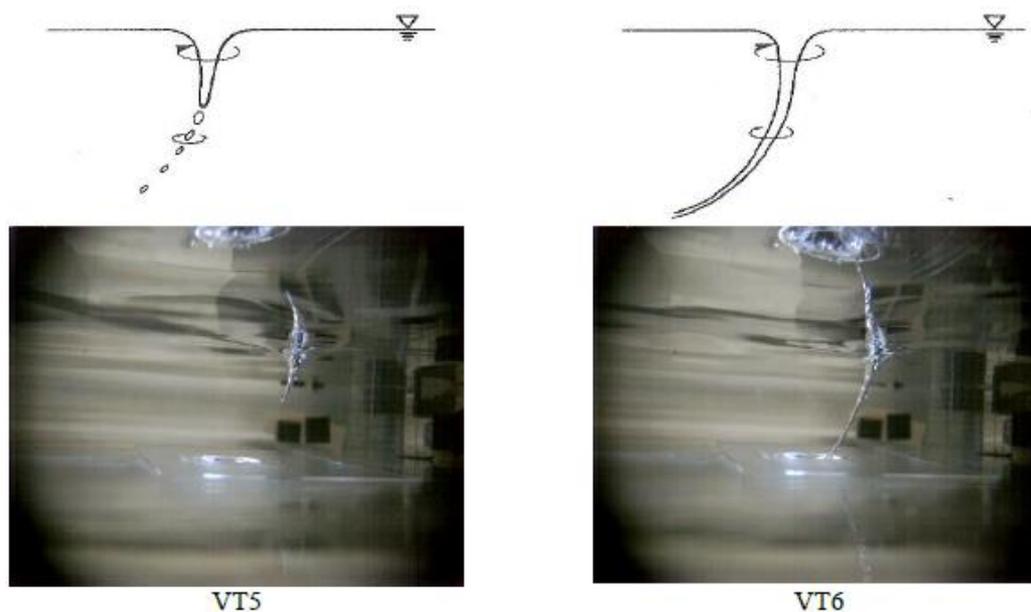


Figura 13. Tipos de vórtices 1-6.
Fuente: Mulligan, 2015.



Figura 14. Vórtice tipo 7
Fuente: Mulligan, 2015.

Visto lo anterior se puede afirmar que los vórtices de tipo 1 a 6 son vórtices débiles, con una estructura vorticial inestable, que incluso los lleva a curvarse en su proceso de formación, en contraparte, el vórtice de tipo 7 se puede catalogar como vórtice fuerte, con un núcleo de aire que llega hasta la sección de salida y cuya silueta vorticial aparece centrada y detallada, características inequívocas de estabilidad en estos fenómenos.

1.6. Centrales de micro generación hidroeléctrica de vórtice gravitacional de agua

Una micro central de micro generación hidroeléctrica de vórtice gravitacional se encarga de aprovechar la energía cinética de un vórtice gravitacional de agua para hacer girar una turbina

de acción de eje vertical, todo dentro de una estructura hidráulica geoméricamente desarrollada para mantener una estructura vorticial estable. La Figura 15 muestra una central de este tipo.



Figura 15. Micro central de vórtice gravitacional en Ober-Grafendorf.
Fuente: Enthusio, 2019.

1.6.1. Características de una central de micro generación hidroeléctrica de vórtice gravitacional de agua

De acuerdo con esta investigación y lo presentado por otros autores, las principales características de este tipo de centrales serían las siguientes:

- Poseen un canal de entrada, un canal de salida y entre estos una estructura contenedora o “tanque” que cuenta con un orificio en la parte inferior, el cual sirve como salida de agua para la formación del vórtice.
- El agua es captada de un río o corriente y es derivada hacia el canal de entrada de la micro-central, posteriormente pasa por el tanque y forma un vórtice fuerte, y finalmente desagua por el orificio de la parte inferior que da con el canal de salida para después regresar al cauce del que fue tomada.
- La micro central se mantendrá en funcionamiento mientras el caudal de operación no salga de unos márgenes establecidos al momento del diseño.
- De acuerdo con las condiciones del flujo y potencia de salida, se puede optar por el uso de compuertas hidráulicas -ubicadas antes del canal de entrada- que regulen el sistema completo.
- Usualmente generan hasta 10 KW de potencia eléctrica, lo que puede ser suficiente para pequeñas comunidades y están en el rango de micro-generación hidroeléctrica. (Timilsina, Mulligan, & Bajracharya, 2018)
- Cuentan con una turbina vertical que se ubica al centro del vórtice, generalmente montada en una viga sobre la estructura del tanque.

- Al no tener trampas, suele ser amigable con la vida acuática que circula por las aguas, ya sean peces u otras especies. (Mulligan, 2015)
- La aireación del agua se ve favorecida por la presencia del vórtice, mejorando su calidad en cuanto a nivel de oxígeno.
- Debido al tamaño que suele tener -el cual no es exagerado- la huella de carbono por la construcción de estas centrales es considerablemente menor que en las centrales tradicionales. (Timilsina et al., 2018)
- El mantenimiento de la central de vórtice suele tener un costo bastante bajo y generalmente se realiza una vez al año, esto debido a que la fuerza del movimiento del agua limpia por si misma al tanque. (Mulligan, 2015)
- De acuerdo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por las Naciones Unidas para el año 2030, este tipo de tecnología cumple con el objetivo número 7 Energía Asequible y no Contaminante, número 9 Industria, Innovación e Infraestructura, número 11 Ciudades y Comunidades Sostenibles y el número 14 Conservación de la Vida Submarina.

1.6.2. Ventajas de las centrales de micro generación hidroeléctrica de vórtice gravitacional de agua

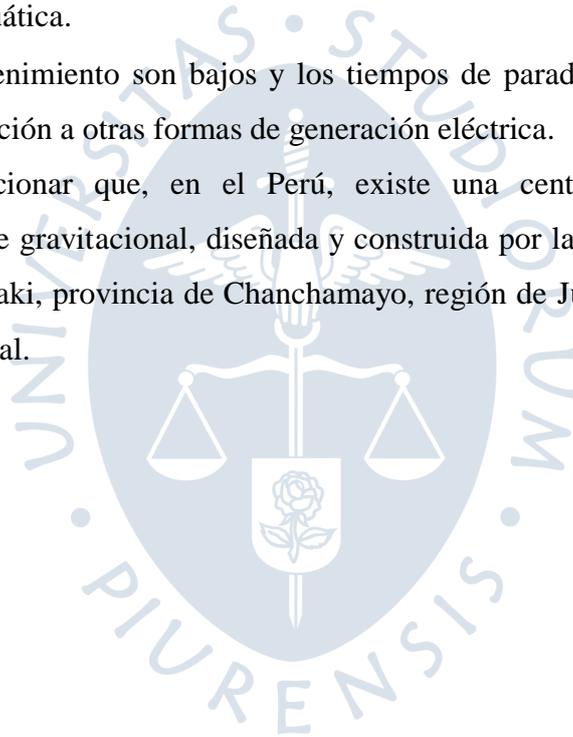
Según la Oficina de Eficiencia Energética y Energías renovables del departamento de Energía de Estados Unidos (EERE, 2017) las ventajas de cualquier central hidroeléctrica son las siguientes:

- Debido a que la fuente de energía es el agua, y esta no genera contaminación, se confirma que es una fuente de energía limpia.
- Ya que las fuentes de agua son propiedad de cada país, la generación hidroeléctrica no está sujeta ni limitada por el mercado internacional, como si lo pueden estar las centrales termoeléctricas que funcionan con combustibles fósiles.
- La energía generada por fuentes hidroeléctricas depende del ciclo hidrológico del agua, el cual está relacionado con el sol, por lo tanto, esto la convierte en una fuente de energía renovable, haciéndola más confiable y asequible.
- Es fácil para las centrales hidroeléctricas alcanzar la máxima potencia de salida una vez puestas en marcha, dicha potencia puede llevarse de inmediato a la red eléctrica.
- Las estructuras creadas para la generación hidroeléctrica, como canales y reservorios suelen beneficiar a la irrigación y suministro de agua.

Por otro lado, si hablamos precisamente de las centrales de micro-generación hidroeléctrica, las ventajas adicionales son las siguientes:

- Generación hidroeléctrica con bajos caudales (generalmente menos de 2 m³/s).
- No requiere grandes alturas de agua (en las centrales construidas la altura máxima del agua es 2 metros)
- Menor costo en la implementación de la estructura, debido a que está no requiere grandes reservorios, sólo un canal y un tanque.
- Facilidad para brindar energía eléctrica a comunidades remotas, alejadas de la red principal.
- Debido a que el suministro de agua suele mantenerse estable a lo largo del tiempo, la generación de potencia eléctrica también permanecerá estable.
- No afecta la vida acuática.
- Los costos de mantenimiento son bajos y los tiempos de parada por mantenimiento son menores en comparación a otras formas de generación eléctrica.

Es preciso mencionar que, en el Perú, existe una central de micro-generación hidroeléctrica de vórtice gravitacional, diseñada y construida por la comunidad de Kadagaya en el distrito de Pichanaki, provincia de Chanchamayo, región de Junín. En el acápite se dan detalles sobre esta central.



Capítulo 2

Modelación numérica

2.1. Ecuaciones básicas de la mecánica de fluidos

Las ecuaciones básicas que rigen a la mecánica de fluidos son la ecuación de conservación de la masa, la segunda ley de Newton o ecuación de la cantidad de movimiento, la ecuación del momento de la cantidad de movimiento y la ecuación de la conservación de la energía. Las mencionadas ecuaciones se aplican a volúmenes de control y en su formulación aparecen tasas de cambio en el volumen de control (Pritchard & Leylegian, 2011)

2.1.1. Ecuación de la conservación de la masa

Por definición de sistema, su masa M es invariable, es decir $M = \text{Constante}$; se puede escribir dicha relación de la siguiente forma

$$\left(\frac{dM}{dt}\right)_{\text{Sistema}} = 0$$

donde,

$$M_{\text{Sistema}} = \int_{M(\text{Sistema})} dm = \int_{\Psi(\text{Sistema})} \rho d\Psi$$

2.1.2. Ecuación de la cantidad de movimiento o momento angular

La segunda ley de Newton nos dice que la suma de todas las fuerzas externas que actúan sobre un sistema es equivalente a la tasa de cambio de la cantidad de movimiento del sistema, es decir:

$$\vec{F} = \left(\frac{d\vec{P}}{dt}\right)_{\text{Sistema}}$$

y,

$$\vec{P}_{\text{Sistema}} = \int_{M(\text{sistema})} \vec{v} dm = \int_{\Psi(\text{sistema})} \vec{v} \rho d\Psi$$

donde, $\vec{P}_{Sistema}$ es la cantidad de movimiento del sistema respecto a un sistema de referencia inercial.

2.1.3. Ecuación de la conservación de la energía

La conservación de energía en un sistema viene dada por la siguiente expresión:

$$\delta Q - \delta W = dE$$

Dicha formulación puede ser expresada en términos de tasa de cambio de la siguiente forma:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \left(\frac{dE}{dt} \right)_{Sistema}$$

La energía total del sistema viene dada por:

$$E_{Sistema} = \int_{M(Sistema)} e \, dm = \int_{\Psi(Sistema)} e \, \rho \, dV$$

donde e es energía por unidad de masa, y está definida como:

$$e = u + \frac{V^2}{2} + gz$$

En esta expresión, u es la energía interna por unidad de masa, $\frac{V^2}{2}$ es la energía cinética por unidad de masa y gz es la energía potencial por unidad de masa, donde z es la altura respecto a un nivel de referencia determinado.

2.2. Ecuaciones de Navier Stokes

Si aplicamos las ecuaciones antes mencionadas a una partícula fluida se obtiene un conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que se denominan ecuaciones de Navier Stokes, las cuales son usadas de manera constante en el estudio de la mecánica de fluidos (Pritchard et al., 2011). En el caso de un fluido incompresible y newtoniano, como el agua, sin presencia de transferencia de calor, las ecuaciones de Navier Stokes se representan de la siguiente manera:

- Ecuación de la continuidad:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

- Ecuación de la cantidad de movimiento:

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right] + \rho f m_x$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right] + \rho f m_y$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] + \rho f m_z$$

Donde μ representa la viscosidad del fluido, p la presión y fm la fuerza másica por unidad de masa.

2.3. Dinámica de fluidos computacional (CFD)

De acuerdo con Tu, Yeoh, & Liu (2013) la dinámica de fluidos computacional integra la de mecánica de fluidos, las matemáticas y las ciencias de la computación, esto se esquematiza en la Figura 16.

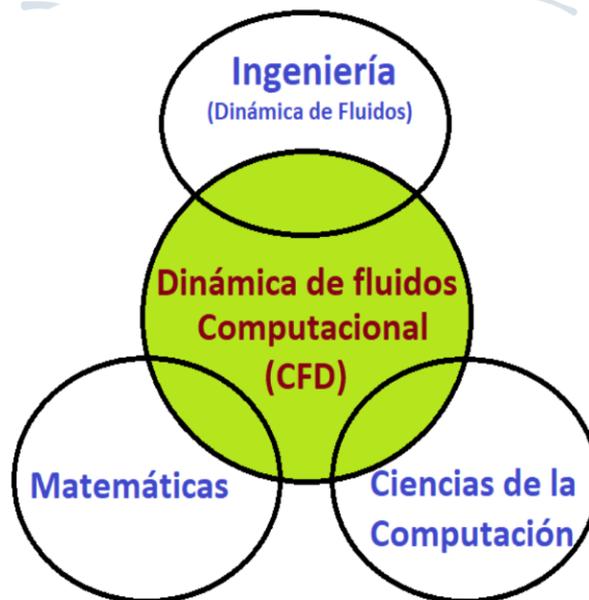


Figura 16. Relación de la dinámica de fluidos computacional con otras ciencias
Fuente: Tu et al. 2013

La dinámica de fluidos computacional (*Computer fluid dynamics* o CFD en inglés) se dedica a modelar numéricamente los fluidos en movimiento, y a estudiar la influencia del

comportamiento del fluido en procesos que pueden incluir transferencia de calor y posibles reacciones químicas como combustión u otras.

Tu et al., (2013) mencionan que las características físicas del fluido en movimiento son usualmente descritas mediante ecuaciones constitutivas. Los matemáticos han desarrollado diversos métodos numéricos para poder resolver las ecuaciones de Navier-Stokes; y apoyados por los expertos en ciencias de la computación se han creado variedad de softwares para resolver dichas ecuaciones. El término “computacional” hace referencia al hecho de que las ecuaciones resultantes contienen numerosas variables y por lo tanto deben ser resueltas usando softwares ejecutados por computadores de alta capacidad.

Como comentan Tu et al., (2013), la dinámica de fluidos computacional se ha convertido en uno de los tres métodos que permiten resolver problemas en la dinámica de fluidos, la Figura 17 muestra estos tres métodos.

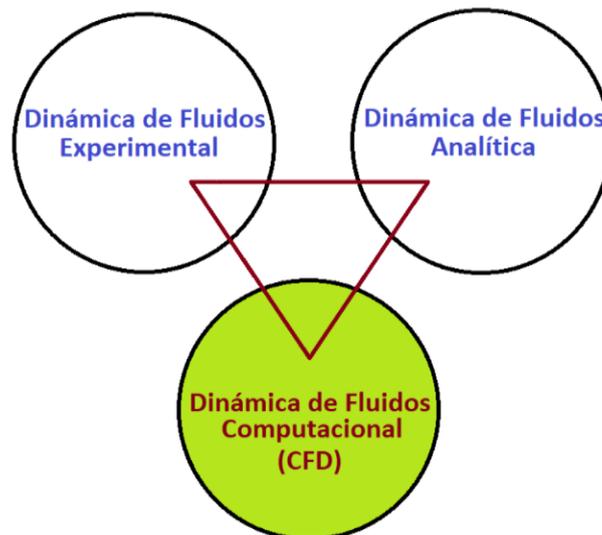


Figura 17. Estudio de la dinámica de fluidos computacional
Fuente: Tu et al. 2013

2.4. Procesos de cálculo en CFD

La solución de problemas mediante la dinámica de fluidos computacional siempre involucra tres fases elementales: Pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento.

Tu et al. (2013) describe estas tres etapas de la siguiente manera:

- Pre-procesamiento: En esta primera fase se define y crea la geometría del dominio computacional del fluido. Posteriormente, se elabora el mallado del dominio, dicho mallado consiste en subdividir el área o volumen del dominio en elementos muy pequeños, mientras más elementos tenga la malla, más precisa será la solución. Con la geometría y el mallado realizados se procede a establecer las propiedades físicas del problema y las características

del fluido en estudio. Finalmente, se definen las condiciones de frontera del problema, con zonas de entrada o salida de flujo, superficies libres o paredes.

- **Procesamiento:** El elemento principal en estas tres fases es el solver o solucionador, el cual se encarga de ejecutar los algoritmos que permiten solucionar las ecuaciones que modelan el problema mediante métodos iterativos. A medida que el programa avanza con las iteraciones, se puede visualizar la convergencia hacia la solución.
- **Post-procesamiento:** La fase final del modelado numérico combina los resultados obtenidos en el solucionador con técnicas gráficas computarizadas para generar imágenes o gráficos que describen en detalle el caso de estudio. Entre los elementos más usados en el post procesamiento tenemos: líneas de corriente, isosuperficies, vectores de velocidad, cuadros de presión o temperatura, etc.

2.5. Modelo de turbulencia k-épsilon (k- ϵ)

La mayoría de los flujos en ingeniería son turbulentos, por lo que es necesario captar los efectos de dicha turbulencia en la solución de los problemas relacionados a los fluidos. La turbulencia se puede generar por distintas causas, desde pequeños disturbios en flujos laminares hasta los efectos que tiene la geometría que recorre el fluido. El efecto de la turbulencia, como mencionan Tu et al., (2013), se aprecia en diferentes propiedades del fluido, incluyendo la velocidad.

Para modelar un flujo turbulento se utilizan mayormente las ecuaciones de Navier Stokes promediadas (en inglés *Reynolds Averaged Navier Stokes equations* o en forma breve *RANS equations*), donde resultan más incógnitas que ecuaciones, por lo que se hace necesario el uso de modelos como el k-épsilon que agrega dos ecuaciones diferenciales, una para la energía cinética turbulenta y otra para la velocidad de disipación de energía cinética turbulenta.

En la Universidad de Piura, el modelo de turbulencia k- ϵ standard ha sido ampliamente usado en diversas investigaciones, de las cuales destacan las siguientes:

- Modelación numérica para determinar la orientación de una bifurcación en el tramo B del río Piura de Luis Noblecilla Palomino (2019), asesorada por el Dr. Jorge Reyes y el Dr. Raúl La Madrid.
- Calibración hidráulica del desarenador San Gabán II analizando los modelos de turbulencia con Telemac- 3D, de Cecilia Ruiz Venegas (2017), asesorada por el Dr. Jorge Reyes.
- Investigación hidráulica utilizando un modelo numérico 3D de la presa Tablones Alto-Chinecas, de Cesar Barreto Escobedo (2016), asesorada por el Dr. Jorge Reyes.

2.6. Modelo multifásico VOF

Como menciona Serkan (2019), uno de los factores clave en la simulación numérica es determinar el modelo matemático correcto que describa la física del problema. En ingeniería, casi todos los casos de estudio comprometen interacción entre: agua, aire, petróleo, etc. Por esta razón, al momento de analizar el problema es necesario contemplar los factores de interacción entre estas sustancias.

Serkan (2019) indica que a pesar de que el agua en estado líquido y el hielo son la misma sustancia, sus propiedades físicas difieren y por lo tanto deben ser tratados como casos separados de la misma materia, esta sería la razón de origen y esencia de los modelos multifásicos.

En general los modelos multifásicos sirven para representar la interacción de dos o más sustancias en sus diferentes fases mediante modelos matemáticos. Sin embargo, la clave para incluir estos modelos en la solución numérica de los flujos radica en tener un modelo suficientemente realista pero simple a la vez. Uno de los modelos multifásicos más conocidos y que garantiza buenos resultados a bajo costo computacional es el VOF o *Volume of fluid*, usado principalmente para flujos separados (es decir que no se mezclan) o en flujos de superficie libre (relacionados al ámbito de la hidráulica en ingeniería civil).

Chung (2010) menciona que el *volume tracking method* (método de rastreo de volúmenes), usualmente conocido como *volume of fluid* (VOF) fue creado en 1975 por Nichols y Hirt. A lo largo de estos años, hasta la actualidad, este método ha sido significativamente mejorado y ampliamente usado en diferentes softwares; sin embargo, la esencia del VOF, que lo describe como un método basado en la conservación de la fracción de volumen con respecto al tiempo y al espacio, no ha cambiado.

En el caso del programa Ansys y de acuerdo con su guía teórica (Ansys, 2011), el modelo VOF puede simular dos o más fluidos inmiscibles mediante la solución de un solo grupo de ecuaciones de momentum y también apoyándose en el rastreo de la fracción de volumen de cada fluido a lo largo del dominio.

Como se ha explicado anteriormente, el método multifásico VOF se usa con mucha recurrencia en las simulaciones de superficie libre, la Figura 18 muestra la simulación de la rápida de una represa en la que se ha empleado el método en cuestión.

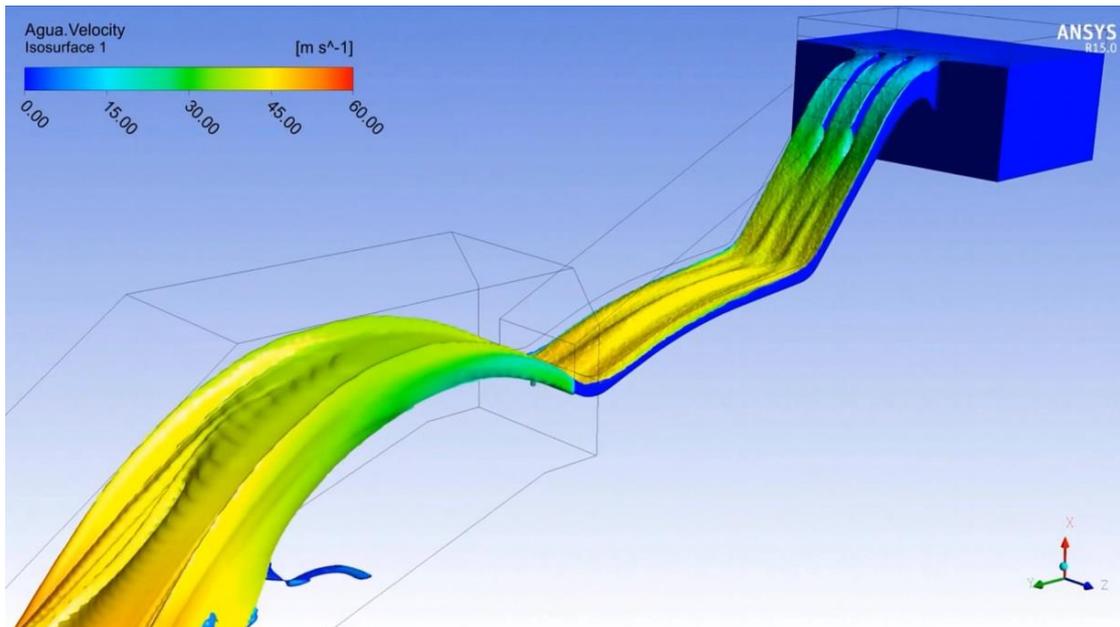


Figura 18. Representación numérica de una rápida de agua
Fuente: CFD NINJA, 2014



Capítulo 3

Modelación de la central de micro generación hidroeléctrica de vórtice gravitacional de agua con Ansys CFX

3.1. Problema de estudio

Uno de los objetivos de este trabajo es establecer una metodología para la simulación numérica del flujo en una central hidroeléctrica de vórtice gravitacional de agua, para lo cual se tomó la geometría y datos de funcionamiento de una central del mismo tipo ubicada en la comunidad de Kadagaya en Junín, Perú. Esta simulación se realizó utilizando el software de dinámica de fluidos computacional (CFD) Ansys CFX.

El modelado de la micro central de vórtice gravitacional se ha dividido en dos casos, en el primero se ha simulado el comportamiento del vórtice en la estructura hidráulica y en el segundo caso se ha incorporado, a la estructura hidráulica, la turbina vertical.

3.2. Caso 1: Estudio de la formación del vórtice en la estructura hidráulica

3.2.1. Pre-procesamiento del caso 1

3.2.1.1. Geometría

La geometría que se usó en la simulación es la misma de la micro central de Kadagaya, a escala natural. La Figura 19 muestra en detalle las dimensiones de la estructura hidráulica de dicha micro central.

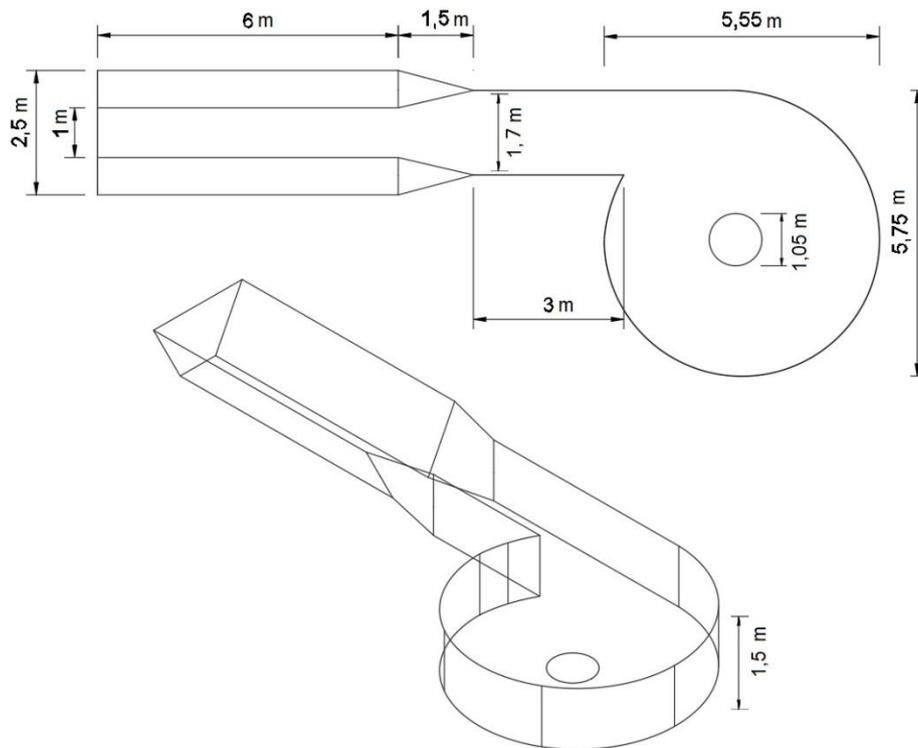


Figura 19. Geometría de la micro central hidroeléctrica de Kadagaya.
Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, conocidas las dimensiones se procedió a llevar el modelo a un formato CAD, el cual finalmente fue exportado al modelador geométrico del programa, la Figura 20 muestra el resultado de llevar el diseño geométrico al modelo virtual.

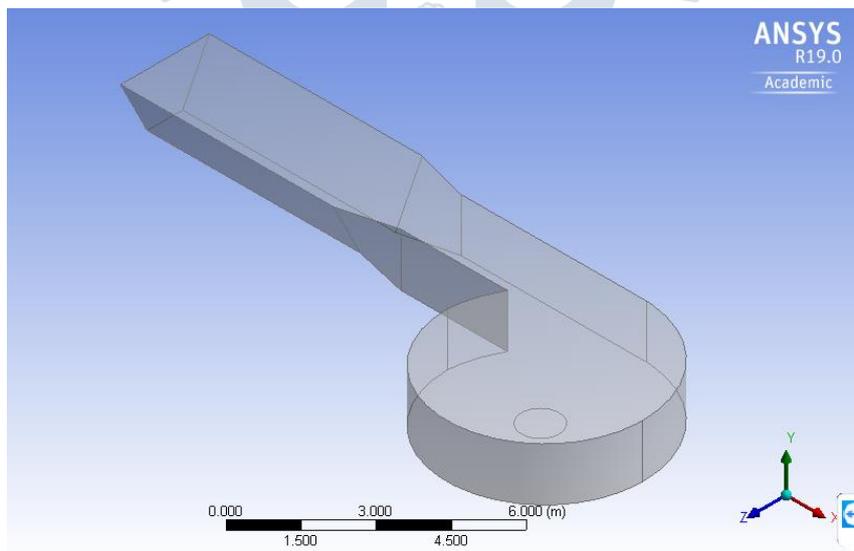
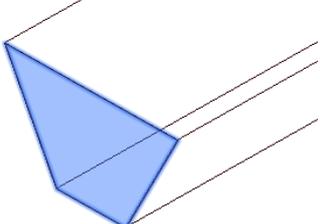
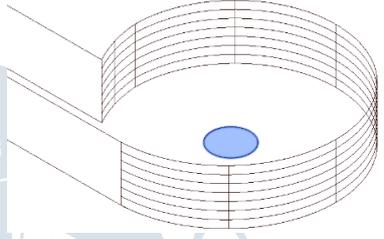
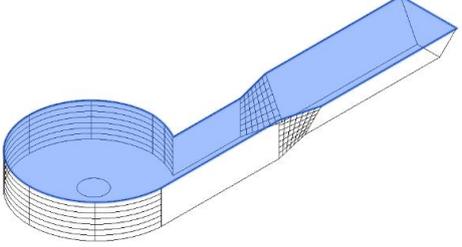
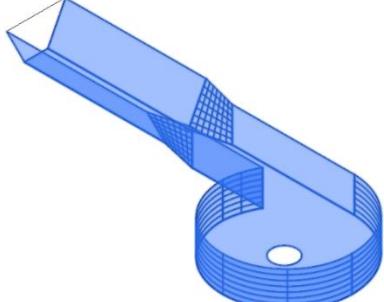


Figura 20. Geometría de la micro central de Kadagaya llevada a Ansys.
Fuente: Elaboración propia

En este caso, todo el volumen que abarca la estructura hidráulica sería el dominio de la simulación, a este dominio se le asignó el nombre de “tanque”.

Con la finalidad brindar una mejor representación del dominio, se estableció una serie de nombres en las caras principales de la estructura, la Tabla 3 describe los distintos nombres asignados a las caras del volumen y la ubicación de estas.

Tabla 3. Nombre de las caras del dominio y ubicación.

Cara	Ubicación	Ilustración
<i>Inlet</i>	Cara trapezoidal al inicio del canal.	
<i>Outlet</i>	Agujero en la parte baja de la estructura hidráulica.	
<i>Ambient</i>	Cara superior de todo el volumen.	
<i>Walls</i>	Todas las caras exteriores que no involucran al <i>inlet</i> , <i>outlet</i> o <i>ambient</i> .	

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.2. Mallado

Una vez establecida la geometría del dominio se procedió a realizar el mallado con el comando *mesh*, el cual consiste en dividir el volumen total en pequeños volúmenes, la Figura 21 muestra el mallado que se realizó en el dominio. Este mallado comprende elementos tetraédricos dispuestos por el comando *size function* en modo *curvature*.

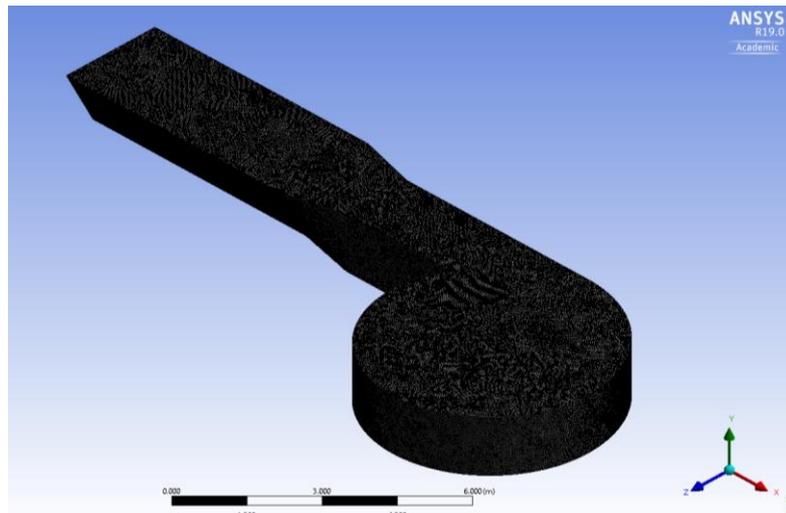


Figura 21. Mallado del dominio.
Fuente: Elaboración propia

Las características de calidad de la malla y cantidad de elementos se pueden apreciar en la Tabla 4 y en cuanto al dimensionamiento de los elementos que la conforman, la Tabla 5 expone sus características.

Tabla 4. Datos de la malla.

Información del mallado	
Número de elementos	6 480 226
Número de nodos	1 133 488
Ortogonalidad (<i>Orthogonality</i>)	0.79
Relación de aspecto (<i>Aspect Ratio</i>)	1.79

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Características de los elementos.

Dimensionamiento de elementos	Tamaño [cm]
Máximo tamaño de cara (<i>Max Face Size</i>)	4
<i>Defeature Size</i>	2
Tasa de crecimiento (<i>Growth Rate</i>)	Por defecto
Tamaño mínimo de elementos (<i>Min Size</i>)	2
Tamaño máximo de tetraedros (<i>Max Size</i>)	4.5

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.3. Propiedades del fluido y condiciones de frontera (Setup)

Para realizar la simulación se debe especificar las propiedades de el o los fluidos que interactúan, así como también las condiciones de frontera del problema. En el software Ansys CFX este proceso se llama *setup*.

Antes de empezar con la caracterización numérica del dominio, se procedió a crear una serie de expresiones que serán útiles para que la simulación sea más eficiente. En la Tabla 6 se dan a conocer estas expresiones.

Tabla 6. Listado de expresiones

Expresión	Definición	Utilidad
UpH	1.35 [m]	Indica la altura de agua en el dominio.
$DenWater$	997 [kg m ⁻³]	Se refieren a las densidades tanto del agua como del aire.
$DenRef$	1.185 [kg m ⁻³]	
$DenH$	(DenWater – DenRef)	Diferencia de densidad del agua y aire.
$UpVFAir$	step((y-UpH)/1[m])	Expresiones útiles para especificar la altura del agua tanto en la condición de entrada como en el dominio general.
$UpVFWater$	1-UpVFAir	
$UpPres$	DenH*g*UpVFWater*(UpH-y)	

Fuente: Elaboración propia

3.2.1.3.1. Propiedades del fluido y del dominio

Durante el proceso de *setup* del software y para poder modelar correctamente el fenómeno, es necesario especificar la información indicada en la Tabla 7.

Tabla 7. Configuración de las propiedades del fluido.

Tipo	Configuración	Valor
Configuración básica	Domain Type	Fluid Domain
	Fluid and Particle Definitions	Air
	Fluid and Particle Definitions > Air > Material	Air at 25 C
	Fluid and Particle Definitions	Water
	Fluid and Particle Definitions > Water > Material	Water
	Domain Models > Pressure > Reference Pressure	1 [atm]
	Domain Models > Buoyancy Model > Option	Buoyant
	Domain Models > Buoyancy Model > Gravity X Dirn.	0 [m s ⁻²]
	Domain Models > Buoyancy Model > Gravity Y Dirn.	-9.81 [m s ⁻²]
	Domain Models > Buoyancy Model > Gravity Z Dirn.	0 [m s ⁻²]
Domain Models > Buoyancy Model > Buoy. Ref. Density	<u>DenRef</u>	
Modelado del fluido	Multiphase > Homogeneous Model	(Selected)
	Multiphase > Free Surface Model > Option	Standard
	Heat Transfer > Option	None
	Turbulence > Option	k-Epsilon
Inicialización	Initialization > Domain Initialization	(Selected)
	Initial Conditions > Velocity Type	Cartesian
	Cartesian Velocity Components > Auto. with Value > U	0.45 [m s ⁻²]
	Cartesian Velocity Components > Auto. with Value > V	0 [m s ⁻²]
	Cartesian Velocity Components > Auto. with Value > W	0 [m s ⁻²]
	Static Pressure > Auto. with Value > Relative Pressure	0 [Pa]
	Turbulence > Option	Medium (5%)
	Fluid Specific Initialization > Air > Initial Conditions > Volume Fraction > Auto. with Value > Volume Fraction	0
	Fluid Specific Initialization > Water > Initial Conditions > Volume Fraction > Auto. with Value > Volume Fraction	1

Fuente: Elaboración propia

Como se puede notar al final de la tabla, esta simulación se inició con un dominio lleno de agua, esta decisión fue basada en el hecho de que la formación del vórtice es más rápida y estable cuando el dominio está inicialmente lleno. La anterior afirmación es una conclusión de una serie de experimentos (aislados) en modelos reales, realizados por el autor de este trabajo, que mediante el uso de recipientes cilíndricos de diferentes diámetros, agujereados en su fondo proporcionalmente a su diámetro (15-20 %) y algunas pequeñas bombas hidráulicas de 240 L/h para controlar el ingreso y salida de agua, que permitieron conocer de primera mano la formación, patrones de comportamiento y estabilidad de los vórtices de superficie libre.

Tanto en los experimentos realizados, como en lo observado en la visita a la micro central de Kadagaya, se pudo apreciar que la superficie libre o espejo de agua variaba en su altura y comportamiento hasta que se lograba estabilizar autónomamente con el paso del tiempo.

3.2.1.3.2. Condiciones de frontera

Las “*boundary conditions*” o condiciones de frontera que se establecieron para la simulación son muy parecidas a las de otras simulaciones de superficie libre, es decir comprenden una entrada, salida, superficie de contacto y superficie al aire libre.

La Tabla 8 muestra las condiciones de frontera en el *inlet*.

Tabla 8. Condición de frontera en el Inlet.

Tipo	Configuración	Valor
Basic Settings	Boundary Type	Inlet
	Location	<u>Inlet</u>
Boundary Details	Mass and Momentum > Option	Normal Speed
	Mass and Momentum > Normal Speed	0.45 [m s ⁻¹]
	Turbulence > Option	Intensity and Length Scale
	Turbulence > Fractional Intensity	0.05
	Turbulence > Eddy Length Scale	UpH
Fluid Values	Boundary Conditions	Air
	Boundary Conditions > Air > Volume Fraction > Volume Fraction	UpVFAir
	Boundary Conditions	Water
	Boundary Conditions > Water > Volume Fraction > Volume Fraction	UpVFWater

Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia en la configuración del *inlet* (se ha asignado un valor de entrada de velocidad normal, este valor corresponde al ingreso de agua a la micro central y fue medido por los miembros de la comunidad de Kadagaya (Alzamora Guzmán, Glasscock, & Whitehouse, 2019). Por otro lado, algunos valores de esta tabla fueron generados por las expresiones

anteriormente mostradas en la Tabla 6 con el fin de limitar el nivel de ingreso de agua en la cara de entrada.

A continuación, la Tabla 9 establece las condiciones de frontera en la salida u *outlet*.

Tabla 9. Condición de frontera en el Outlet.

Tipo	Configuración	Valor
Basic Settings	Boundary Type	Outlet
	Location	Outlet
Boundary Details	Flow Regime > Option	Subsonic
	Mass and Momentum > Option	Static Pressure
	Mass and Momentum > Relative Pressure	0

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 10 especifica las condiciones de frontera en la superficie abierta u *opening*.

Tabla 10. Condición de frontera del Ambient.

Tipo	Configuración	Valor
Basic Settings	Boundary Type	Opening
	Location	<u>Ambient</u>
Boundary Details	Mass and Momentum > Option	Entrainment
	Mass and Momentum > Relative Pressure	0
	Turbulence > Option	Zero Gradient
Fluid Values	Boundary Conditions	Air
	Boundary Conditions > Air > Volume Fraction > Volume Fraction	1
	Boundary Conditions	Water
	Boundary Conditions > Water > Volume Fraction > Volume Fraction	0

Fuente: elaboración propia

Finalmente, la Tabla 11 muestra las condiciones de frontera en las paredes o *walls*.

Tabla 11. Condición de frontera de las Walls.

Tipo	Configuración	Valor
Basic Settings	Boundary Type	Wall
	Location	<u>Walls</u>
Boundary Details	Mass and Momentum > Option	No Slip Wall
	Wall Roughness > Option	Smooth Wall

Fuente: Elaboración propia

Una vez especificadas las condiciones de frontera, el software genera una imagen con la geometría bajo dichas condiciones, la cual se aprecia en la Figura 22.

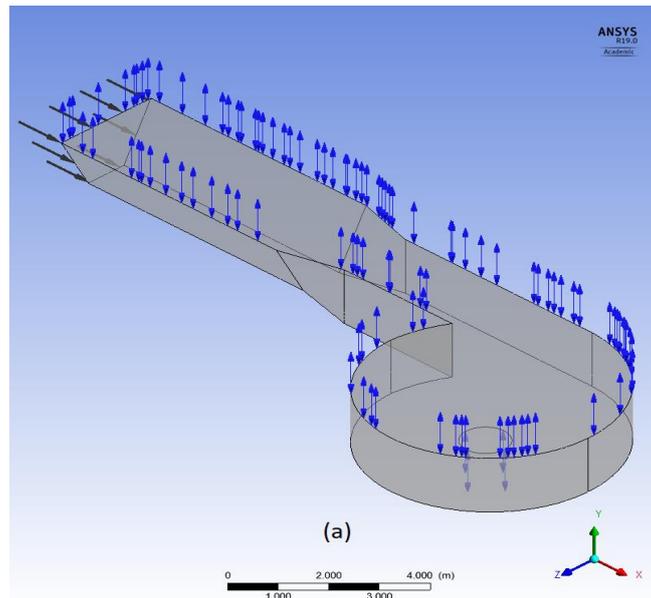


Figura 22. Superficies del dominio donde se especifican condiciones de frontera.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 22 aparecen unas flechas indicadoras en aquellas superficies del dominio en las que se especificaron las condiciones de frontera. Las flechas negras ubicadas en la cara del *inlet* indican que está ingresando fluido a velocidad uniforme por toda el área; por otro lado, las flechas azules bidireccionales en la cara superior (denominada *ambient*) indican la superficie libre u *opening*, en tanto, las flechas ubicadas en el orificio de salida señalan la condición de *outlet*.

3.2.1.4. Configuración del tipo de análisis

En esta simulación se optó por un análisis de flujo en estado transitorio, con la finalidad de apreciar el movimiento del vórtice, la configuración que se plasmó en el programa se puede ver en la Tabla 12.

Tabla 12. Configuración del análisis.

Tipo	Configuración	Valor
	Analysis Type	Transient
Basic Settings of the Analysis Type	Time Duration > Total Time	250 [s]
	Time Steps > Time Steps	0.5 [s]
	Initial Time > Automatic with Value	0 [s]

Fuente: Elaboración propia

Es bueno resaltar que el paso de la variable tiempo en toda la simulación fue de 0.5 s, es decir, que se obtuvieron y guardaron datos de cada medio segundo del fenómeno en la simulación.

3.2.1.5. Configuración del control del solucionador y del control de salida

En la configuración del control del solucionador se mantuvieron los valores especificados por defecto por el programa, la Tabla 13 muestra los parámetros usados.

Tabla 13. Configuración del solucionador.

Solver Control		
Configuración Básica del Solucionador	Transient Scheme > Timestep Initialization > Option	Automatic
	Turbulence Numerics > Option	First Order
	Convergence Control > Min. Coeff. Loops	1
	Convergence Control > Max. Coeff. Loops	10
	Fluid Timescale Control > Timescale Control	Coefficient Loops
	Convergence Criteria > Residual Type	RMS
	Convergence Criteria > Residual Target	1.E-4

Fuente: Elaboración propia

En el caso del control de salida, se optó por agregar la opción de guardado de los estados transitorios que se desarrollan a cada paso de tiempo de la simulación, posteriormente estos resultados serán de ayuda para analizar el comportamiento del vórtice en diferentes instantes. La Tabla 14 muestra la configuración de este control de salida.

Tabla 14. Configuración del control de salida.

Output Control		
Trn Results	Transient Results > Add New Item	Ok
	Transient Results 1 > Option	● Standard
	Transient Results 1 > File Compression	Default
	Output Frequency > Option	Everytime Timestep

Fuente: Elaboración propia

Con la fase final del módulo *setup* configurada, se procedió a ejecutar el módulo del procesamiento numérico del modelo.

3.2.2. Procesamiento del caso 1

3.2.2.1. Solución numérica

Al ingresar al módulo del solucionador, fue necesario activar los controles avanzados (*Show Advance Controls*). Posteriormente se eligió la configuración de la Tabla 15.

Tabla 15. Configuración de la ejecución del procesamiento.

Define Run			
Global Run Settings	Run	Run Settings > Double Precision	Selected
	Definition	Parallel Environment > Run Mode > Intel MPI Distributed Parallel > Partitions	28
	Partitioner	Partitioner Memory > Detailed Memory Overrides > Real Memory	10x

Fuente: Elaboración propia

En el caso del *partitioner* se decidió aumentar su capacidad para mejorar los resultados del procesamiento de la simulación.

Al momento de procesar los datos, se obtuvieron gráficas interesantes que permiten apreciar la calidad de la simulación, en este sentido la Figura 23 muestra los residuales del volumen y el momento.

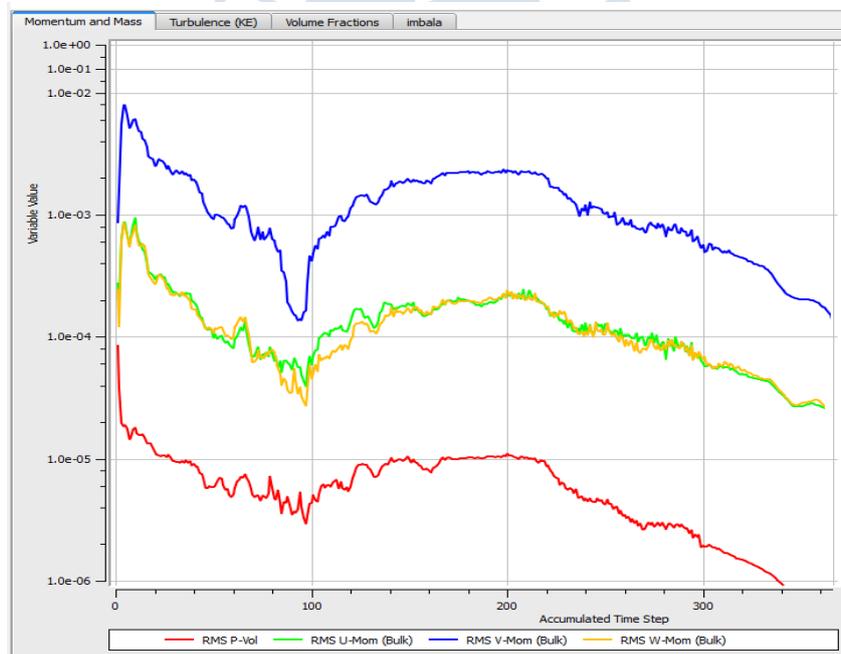


Figura 23. Residuales del caso 1.

Fuente: Elaboración propia.

Las curvas de la Figura 23 muestran los valores residuales o RMS, estos valores son el resultado del promedio de la iteración actual y la iteración anterior aplicados a las variables que se deberían conservar, tales como la masa, energía, etc.

Los residuales indican la precisión numérica de la solución del conjunto de ecuaciones del modelo; y, por lo tanto, el nivel de error en la simulación, mientras menor sean los valores de los residuales los resultados de la simulación estarán más cerca de la solución exacta del modelo matemático. En este caso se aprecia con claridad que los valores residuales son bastante

bajos, por ejemplo, de la Figura 23, el mayor RMS residual (v-mon) es aproximadamente 2.0×10^{-4} , valor que de acuerdo con el *ANSYS CFX – Solver Modeling Guide* (página 475), es muy aceptable para la confiabilidad de las simulaciones.

Por otro lado, también se puede monitorear la gráfica de los desbalances, los cuales corroboran que tanto la masa y volumen que ingresan al dominio sean muy parecidos a los datos de salida de estas mismas variables. La Figura 24 exhibe la gráfica de desbalances en este caso.

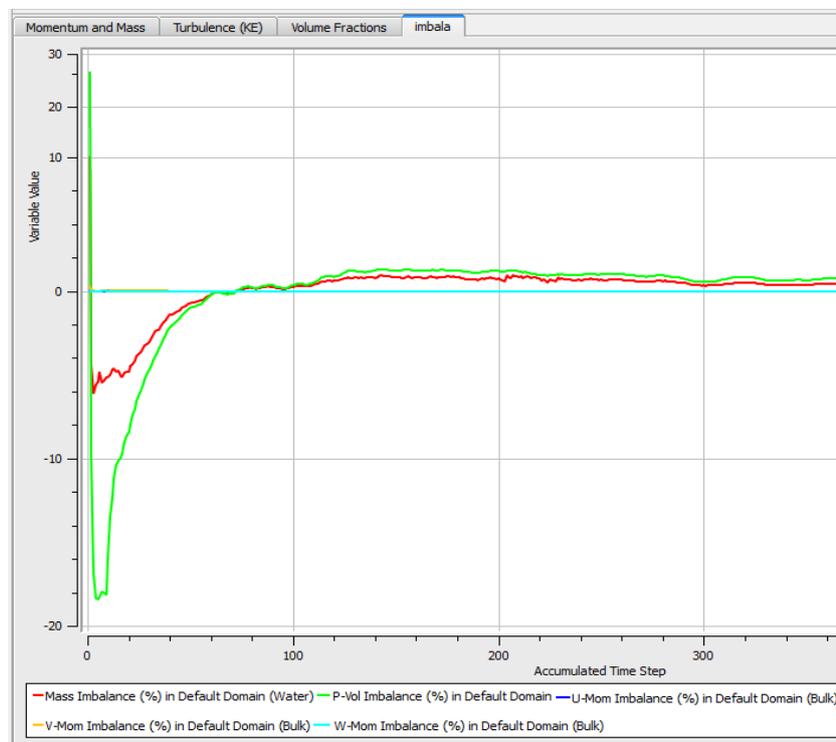


Figura 24. Desbalances caso 1.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar, los desbalances en cada caso son menores al 2%, y al ser valores muy bajos, se consideran resultados muy aceptables.

3.3. Incorporación de la turbina a la estructura hidráulica

3.3.1. Pre-procesamiento del caso 2

3.3.1.1. Geometría

En este segundo caso, a la geometría anterior se le sustrajo un cilindro central, ver Figura 25 (a), y posteriormente se puso en su lugar otro cilindro del que se extrajo la región ocupada por el rotor de la turbina vertical usada en la micro central, ver Figura 25 (b); de esta forma, se

tienen 2 volúmenes acoplados, pero independientes entre sí, como se aprecia en la Figura 25 (c).

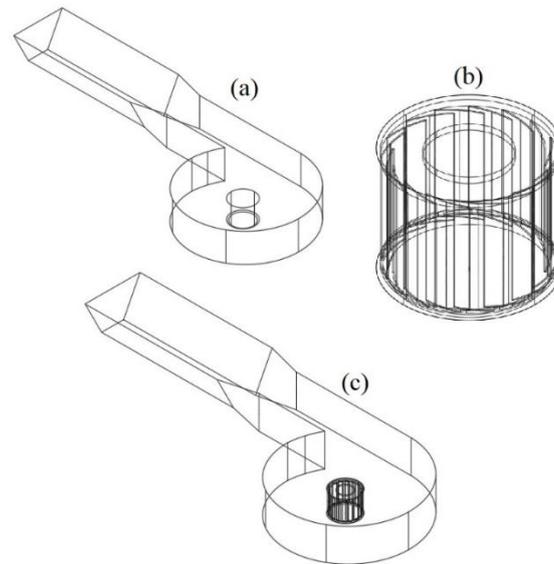


Figura 25. Geometría completa de la micro central hidroeléctrica de Kadagaya.
Fuente: Elaboración propia.

Las características geométricas del rotor de la turbina son las indicadas en el artículo publicado por la comunidad de Kadagaya (Alzamora Guzmán et al., 2019), 0.9 m de altura, 1.15 m de diámetro, 16 álabes y el ángulo que forma la tangente a la cara superior de la turbina con la tangente en el borde exterior de las palas es de 16° (ver Figura 26a). Para facilitar el mallado se consideró álabes de 1 cm de ancho. La geometría de la turbina, como se mencionó antes, fue sustraída de un cilindro de las siguientes dimensiones: 1.2 m de diámetro y 0.95 m de alto (2 cm más por encima y 3 cm más por debajo de las caras del rotor). En la micro central existente, la distancia del fondo del tanque a la cara inferior de la turbina es de 7 cm, y debido a que ya se tienen 3 cm desde el cilindro a la turbina, entonces, el cilindro que alberga la turbina estará ubicado a 4 cm del fondo (ver Figura 26b).

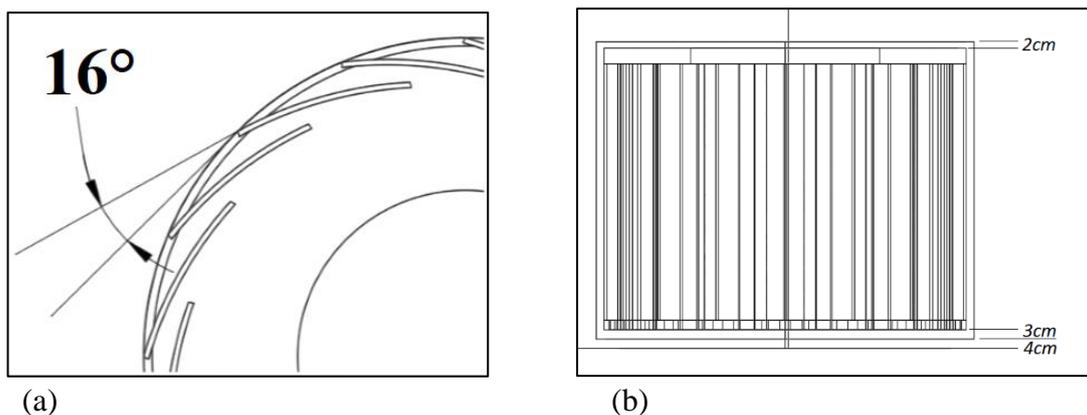


Figura 26. (a) y (b) Detalles de la turbina vertical.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 27 muestra la geometría completa llevada a Ansys.

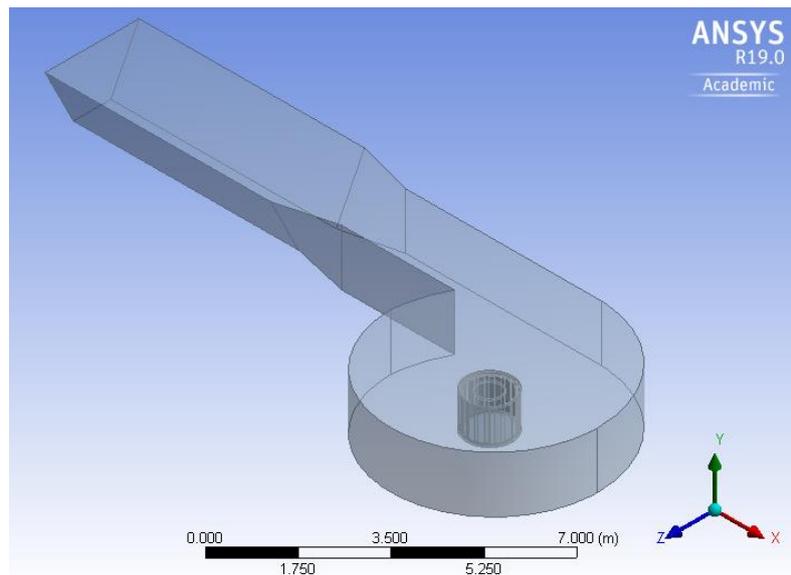


Figura 27. Geometría completa de la micro central hidroeléctrica de Kadagaya en Ansys.
Fuente: Elaboración propia.

En esta nueva simulación, al ser dos volúmenes diferentes agrupados, se tuvieron también dos dominios, el primero y más grande es el de la estructura hidráulica, al que se llamó “tanque”, y el segundo, el cual sería el cilindro agregado del que se sustrajo el rotor de la turbina, se denominó “turbina”.

A raíz de esto, se procedió a nombrar las diferentes caras de ambos dominios; en el caso del dominio tanque, la Tabla 16 muestra los diferentes nombres y ubicaciones de las caras.

Tabla 16. Nombre de las caras del dominio “Tanque” y ubicación.

Cara	Ubicación
<i>Inlet:</i>	Cara trapezoidal al inicio del canal.
<i>Outlet:</i>	Agujero en la parte baja de la estructura hidráulica.
<i>Ambient:</i>	Cara superior de todo el volumen.
<i>UpTank:</i>	Cara superior del cilindro sustraído dentro del tanque.
<i>MedTank:</i>	Superficie lateral del cilindro sustraído del tanque.
<i>BotTank:</i>	Cara inferior del cilindro sustraído dentro del tanque.
<i>Walls:</i>	Todas las caras exteriores que no involucran al <i>inlet</i> , <i>outlet</i> o <i>ambient</i> .

Fuente: Elaboración propia.

Del mismo modo, se asignaron nombres a las caras del dominio donde se ubica el rotor, los cuales se indican en la Tabla 17.

Tabla 17. Nombre de las caras del dominio “Turbina” y ubicación.

Cara	Ubicación
<i>Blades:</i>	Todas las caras de la turbina sustraída del cilindro
<i>UpTurb:</i>	Cara superior del cilindro extraído y que contiene al rotor de la turbina.
<i>MedTurb:</i>	Superficie lateral del cilindro extraído y que contiene al rotor de la turbina.
<i>BotTurb:</i>	Cara inferior del cilindro extraído y que contiene al rotor de la turbina.

Fuente: Elaboración propia.

Entre las tres caras añadidas al dominio tanque y las correspondientes del dominio turbina, cuyos nombres empiezan con *up*, *med* y *bot*, existe una interacción que se modeló mediante interfases, de las cuales se hablará más adelante en este capítulo. La Figura 28 muestra la ubicación de las caras usadas en las diferentes interfases.

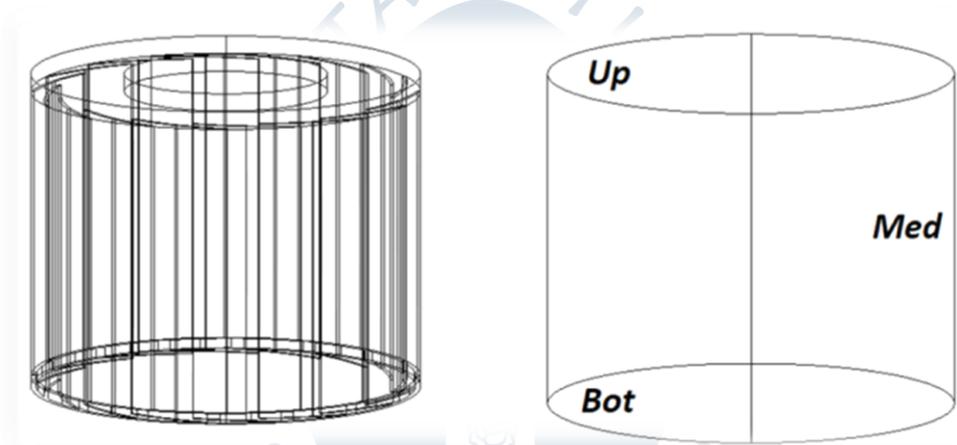


Figura 28. Ubicación de las interfases.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.2. Mallado

El mallado de ambos dominios se realizó sin complicaciones, sin embargo, era menester considerar que el ancho de los alabes influye en la caracterización de los elementos de la malla. La Figura 29 muestra el resultado del mallado realizado y además hace un acercamiento a la zona de la turbina, donde se aprecian elementos más pequeños.

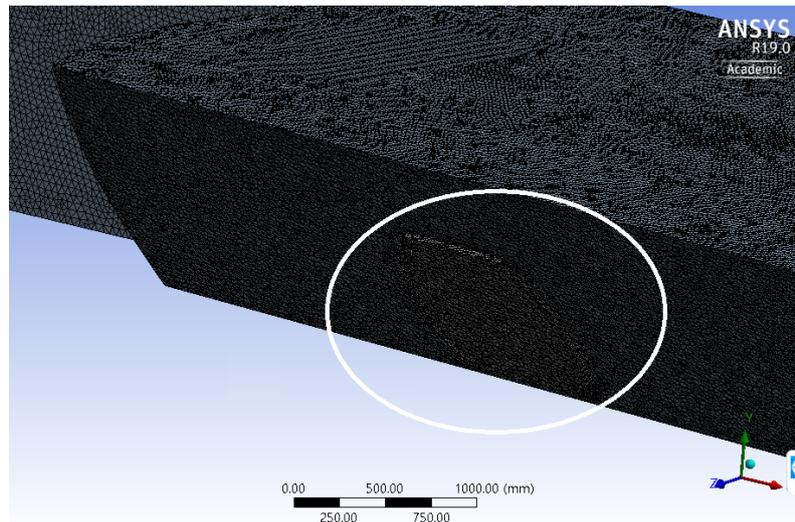


Figura 29. Mallado de ambos dominios.
Fuente: Elaboración propia.

Las características de calidad de esta malla se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18. Datos de la segunda malla.

Información del mallado	
Número de elementos	6 505 692
Número de nodos	1 144 903
Ortogonalidad (<i>Orthogonality</i>)	0.79
Relación de aspecto (<i>Aspec Ratio</i>)	1.8

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, el ancho de los álabes jugó un papel muy importante al momento de decidir las dimensiones de los elementos de la malla, la Tabla 19 muestra las características geométricas de los elementos usados en el mallado.

Tabla 19. Características de los elementos de la segunda malla.

Dimensionamiento de elementos	Tamaño [cm]
Máximo tamaño de cara (<i>Max Face Size</i>)	4
<i>Defeature Size</i>	1
Tasa de crecimiento (<i>Growth Rate</i>)	Por defecto
Tamaño mínimo de elementos (<i>Min Size</i>)	1
Tamaño máximo de tetraedros (<i>Max Size</i>)	4.5

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.3. Propiedades del fluido, condiciones de frontera e interfases (Setup)

En este segundo caso se mantienen las expresiones añadidas en el caso anterior (ver Tabla 6), pero, se debe considerar que ahora existen dos dominios y por lo tanto se deben caracterizar las condiciones de cada uno con el fin de que la simulación sea fiable.

3.3.1.3.1. Propiedades del fluido, dominios e inicialización

En esta fase se añadirán las propiedades de los fluidos, las características físicas del fenómeno y la configuración de ambos dominios, incluyendo la inicialización de estos mismos.

En la Tabla 20 se puede constatar la configuración puesta.

Tabla 20. Configuración general de las propiedades del fluido y dominios.

Tipo	Configuración	Valor
Configuración básica	Domain Type	Fluid Domain
	Fluid and Particle Definitions	Air
	Fluid and Particle Definitions > Air > Material	Air at 25 C
	Fluid and Particle Definitions	Water
	Fluid and Particle Definitions > Water > Material	Water
	Domain Models > Pressure > Reference Pressure	1 [atm]
	Domain Models > Buoyancy Model > Option	Buoyant
	Domain Models > Buoyancy Model > Gravity X Dirn.	0 [m s ⁻²]
	Domain Models > Buoyancy Model > Gravity Y Dirn.	-9.81 [m s ⁻²]
	Domain Models > Buoyancy Model > Gravity Z Dirn.	0 [m s ⁻²]
	Domain Models > Buoyancy Model > Buoy. Ref. Density	<u>DenRef</u>
Config. del dominio "Turbina"	Domain Motion > Option	Rotating
	Angular Velocity [rev min ⁻¹]	-55
	Axis Definition > Option	Two Points
	Rotation Axis From	[0;0;0]
	Rotation Axis To	[0;0.98;0]
Modelado del fluido	Multiphase > Homogeneous Model	(Selected)
	Multiphase > Free Surface Model > Option	Standard
	Heat Transfer > Option	None
	Turbulence > Option	k-Epsilon
Inicialización del dominio "Tanque"	Initialization > Domain Initialization	(Selected)
	Initial Conditions > Velocity Type	Cartesian
	Cartesian Velocity Components > Auto. with Value > U	0.45 [m s ⁻²]
	Cartesian Velocity Components > Auto. with Value > V	0 [m s ⁻²]
	Cartesian Velocity Components > Auto. with Value > W	0 [m s ⁻²]
	Static Pressure > Auto. with Value > Relative Pressure	0 [Pa]
	Turbulence > Option	Medium (5%)
	Fluid Specific Initialization > Air > Initial Conditions > Volume Fraction > Auto. with Value > Volume Fraction	0
	Fluid Specific Initialization > Water > Initial Conditions > Volume Fraction > Auto. with Value > Volume Fraction	1
	Inicialización del dominio "Turbina"	Initialization > Domain Initialization > Frame Type
Initial Conditions > Velocity Type		Cartesian
Cartesian Velocity Components > Auto. with Value > U		0 [m s ⁻²]
Cartesian Velocity Components > Auto. with Value > V		0 [m s ⁻²]
Cartesian Velocity Components > Auto. with Value > W		0 [m s ⁻²]
Static Pressure > Auto. with Value > Relative Pressure		0 [Pa]
Turbulence > Option		Medium (5%)
Fluid Specific Initialization > Air > Initial Conditions > Volume Fraction > Auto. with Value > Volume Fraction		0
Fluid Specific Initialization > Water > Initial Conditions > Volume Fraction > Auto. with Value > Volume Fraction		1

Fuente: Elaboración propia

Es oportuno mencionar que el movimiento del rotor de la turbina fue simulado de la misma manera que se hace con las turbomáquinas, esto fue una recomendación propuesta por los asesores de Ansys CFX a través de una consulta sobre la forma de abordar el fenómeno. En este caso, la velocidad de giro fue obtenida del artículo científico de la comunidad de Kadagaya, donde se especifican 55 rpm.

3.3.1.3.2. Condiciones de frontera

Por otro lado, las condiciones de frontera del caso anterior se mantienen, sin embargo, se agrega una condición más que tiene que ver con la modelación de los álabes de la turbina cómo paredes sólidas dentro de la simulación. En la Tabla 21 se puede apreciar la condición que se le dio a las caras de la turbina.

Tabla 21. Condición de frontera de la turbina.

Tipo	Configuración	Valor
Basic Settings	Boundary Type	Wall
	Location	<u>Blades</u>
	Frame Type	Rotating
Boundary Details	Mass and Momentum > Option	No Slip Wall
	Wall Roughness > Option	Smooth Wall

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.4. Interfases

Como se mencionó anteriormente, las caras colindantes de la estructura del tanque y el cilindro de la turbina deben relacionarse entre sí para poder completar de forma adecuada la interacción entre ambos dominios, en esta situación se requiere el uso de las llamadas interfases, las cuales permiten relacionar los datos de ingreso de una cara a otra, y de esta manera alcanzar la solución numérica correcta.

En este caso existieron tres interfases, la interfaz “*bot*” (ver Tabla 22) para relacionar la cara inferior del dominio turbina con su correspondiente en el dominio tanque. La interfaz “*Med*” (ver Tabla 23) relaciona el área lateral del cilindro de ambos dominios. Finalmente, la interfaz “*Up*” (ver Tabla 24) relaciona la cara superior de los dominios.

Tabla 22. Configuración de la interfaz BOT.

Tipo	Configuración	Valor
Basic Settings of BOT	Interface Type	Fluid-Fluid
	Interface Side 1 > Domain (Filter)	Tanque
	Interface Side 1 > Region List	<u>BotTank</u>
	Interface Side 2 > Domain (Filter)	Turbina
Interface	Interface Side 2 > Region List	<u>BotTurb</u>
	Interface Models > Option	General Connection
	Frame Change / Mixing Model > Option	Transient Rotor Stator
	Pitch Change > Option	Automatic

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23. Configuración de la interfaz MED.

Tipo	Configuración	Valor
Basic Settings of MED Interface	Interface Type	Fluid-Fluid
	Interface Side 1 > Domain (Filter)	Tanque
	Interface Side 1 > Region List	<u>MedTank</u>
	Interface Side 2 > Domain (Filter)	Turbina
	Interface Side 2 > Region List	<u>MedTurb</u>
	Interface Models > Option	General Connection
	Frame Change / Mixing Model > Option	Transient Rotor Stator
	Pitch Change > Option	Automatic

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Configuración de la interfaz UP.

Tipo	Configuración	Valor
Basic Settings of UP Interface	Interface Type	Fluid-Fluid
	Interface Side 1 > Domain (Filter)	Tanque
	Interface Side 1 > Region List	<u>UpTank</u>
	Interface Side 2 > Domain (Filter)	Turbina
	Interface Side 2 > Region List	<u>UpTurb</u>
	Interface Models > Option	General Connection
	Frame Change / Mixing Model > Option	Transient Rotor Stator
	Pitch Change > Option	Automatic

Fuente: Elaboración propia

Es preciso mencionar que la opción *transient rotor stator* sólo se activa al momento de definir que el tipo de análisis es transitorio.

3.3.1.5. Configuración del tipo de análisis y control del solucionador

Las características del solucionador se mantienen semejantes del caso anterior, por lo que no hay más modificaciones en este sentido.

3.3.2. Procesamiento del caso 2

3.3.2.1. Solución numérica

En cuanto a las gráficas que se obtienen mientras se realiza la simulación numérica, la Figura 30 muestra que, en forma general, el conjunto de los dos dominios presenta buenas características en los residuales obtenidos, siendo estos muy bajos por lo que se espera que los resultados sean muy acertados.

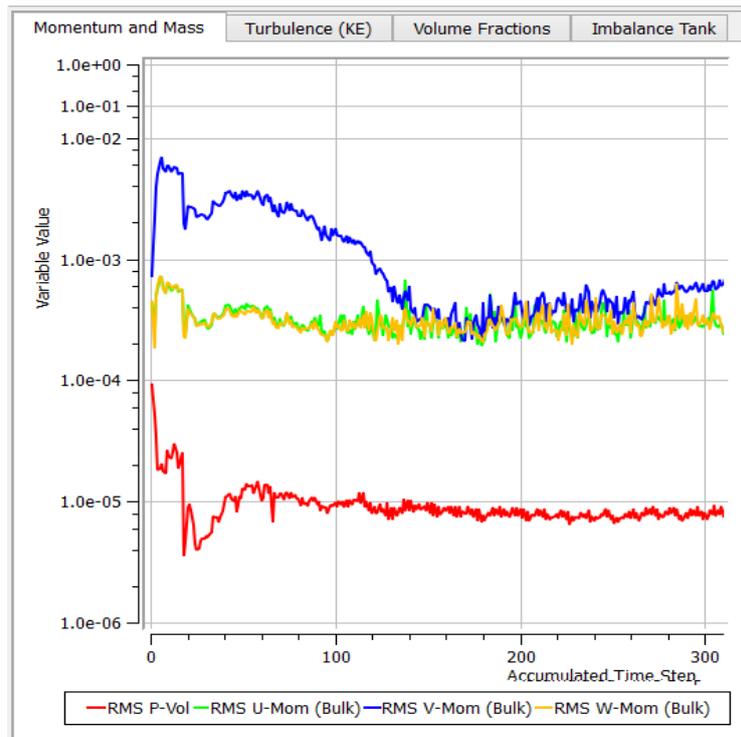


Figura 30. Residuales del Segundo caso de simulación
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, también se visualizaron los resultados de los desbalances (en términos de masa, fracción de volumen y cantidad de movimiento) de cada dominio, para el tanque (ver Figura 31) y turbina (ver Figura 32), y como se esperaba, dichos desbalances son bastante bajos por lo que los resultados de la solución numérica pueden considerarse fidedignos.

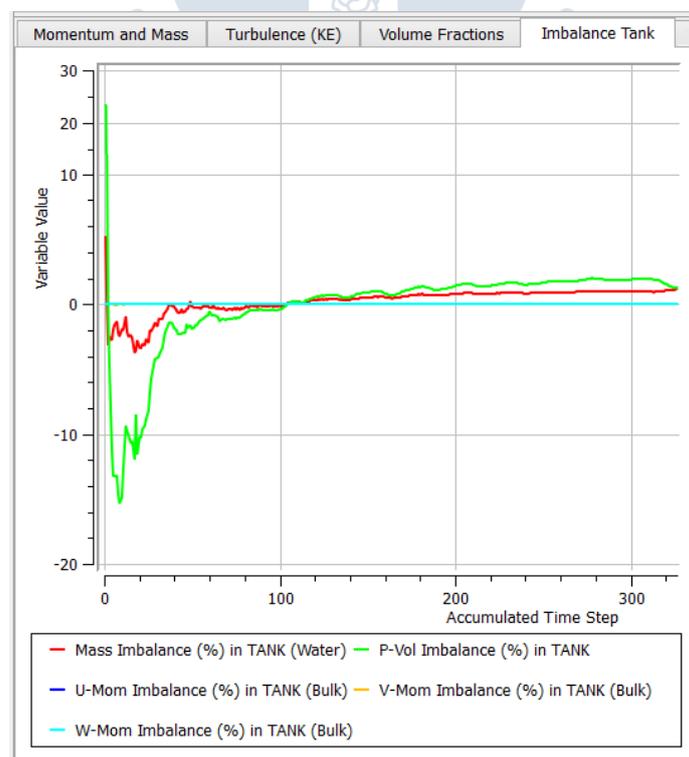


Figura 31. Desbalances del dominio del tanque.
Fuente: Elaboración propia

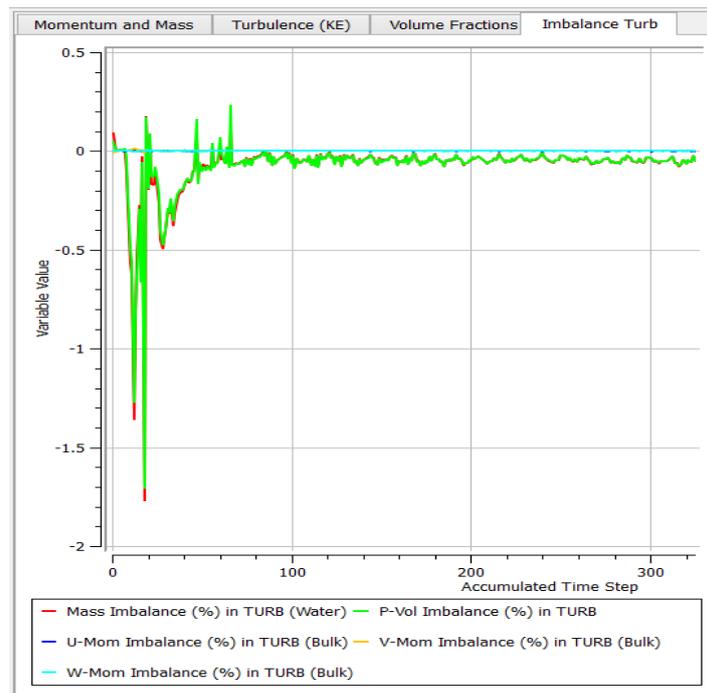
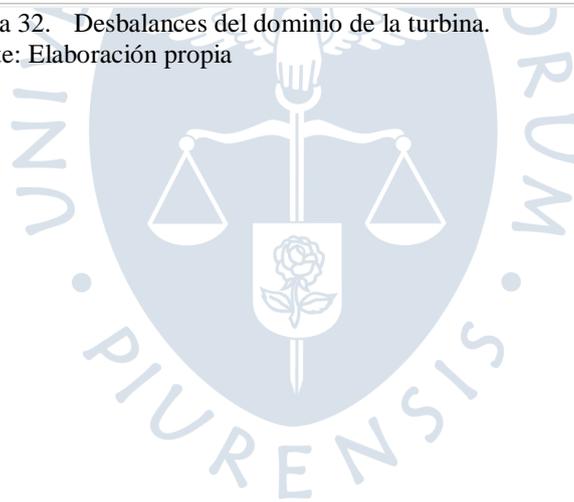


Figura 32. Desbalances del dominio de la turbina.
Fuente: Elaboración propia



Capítulo 4

Artículo científico: Metodología para el modelado numérico de una micro central de generación hidroeléctrica impulsada por un vórtice gravitacional de agua

Helio H. García¹, Daniel G. Camacho², Raúl La Madrid², Daniel Marcelo³ y Jorge D. Reyes⁴

(1) Bach. Ingeniería Civil, Universidad de Piura. (2) Fac. Ingeniería, Dpto. Ciencias de la Ingeniería, Universidad de Piura. (3) Sección Energía, Fac. de Ingeniería, Universidad de Piura. (4) Inst. de Hidráulica, Hidrología e Ing. Sanitaria, Universidad de Piura. E-mail de contacto: raul.lamadrid@udep.pe

Resumen

Las micro centrales de generación hidroeléctrica de vórtice gravitacional son una nueva alternativa sustentable e innovadora para suplir la demanda de electricidad en comunidades aisladas de la red eléctrica principal. El estudio realizado consistió en la simulación numérica, mediante el uso del software Ansys CFX, del comportamiento de este tipo de centrales. Se tomó como modelo la micro central de la comunidad de Kadagaya en Junín, Perú. La metodología de esta investigación consistió en 2 fases, la primera fase tuvo como objetivo estudiar las características del vórtice formado en el tanque de la estructura hidráulica, la segunda etapa consistió en estudiar el fenómeno del flujo con la turbina en su interior. Con el objetivo de comprender el funcionamiento de la central y de obtener datos para poder validar la simulación, se decidió realizar una visita a la comunidad. Este estudio logra probar que los resultados obtenidos de la simulación se asemejan a las características del comportamiento real de este tipo de centrales.

Palabras clave: Vórtice gravitacional, micro centrales hidroeléctricas, modelado numérico, turbinas, Ansys CFX

Methodology for the numerical modeling of a gravitational water vortex hydroelectric power plant

Abstract

The gravitational vortex hydroelectric power plants are a new sustainable and innovative alternative to cover the demand for electricity in isolated communities of the main power grid. This

investigation involved numerical simulation, by using Ansys CFX software, of the behavior of these types of power plants. The micro hydropower plant of the Kadagaya community in Junín, Peru was taken as a model. The methodology of this investigation consisted of 2 phases, the first phase aimed to study the characteristics of the vortex formed in the tank of the hydraulic structure, the second stage consisted of studying the phenomenon of flow with the turbine inside. In order to understand the operation of the plant and obtain data to validate the simulation, it was decided to visit the community. This study manages to prove that the results obtained from the simulation resemble the characteristics of the real behavior of this type of power plants.

Keywords: Gravitational vortex, micro-hydro power generation, numerical modeling, turbines, Ansys CFX

INTRODUCCIÓN

La demanda de electricidad crece cada vez más en los países en vías de desarrollo; por ejemplo, en América Latina se prevé que la demanda crezca entre un 2.7% y un 3.6% anual hasta el año 2040, y serán necesarios entre 2.800 y 3.500 Twh, cantidad que casi duplica a la actual (Amaia Ormaetxea, 2019). Sin embargo, para las comunidades alejadas de las grandes ciudades es complicado acceder a este servicio. Es en este sentido, que se ha empezado a trabajar en formas de generación aisladas del Sistema Eléctrico Interconectado, las cuales puedan suplir las necesidades básicas de una comunidad. Dentro de estas nuevas alternativas se encuentra la micro central de generación hidroeléctrica de vórtice gravitacional de agua o GWVHP (*Gravitational Water Vortex Hydropower Plant*) por sus siglas en inglés, la cual se encuentra aún en desarrollo, pero tiene el potencial para ser una alternativa de solución de este problema.

La micro central de vórtice gravitacional se hizo conocida por su descubridor, el ingeniero austriaco Franz Zotlöterer, quien construyó la primera central de este tipo en el año 2002; posteriormente, empezó a difundir esta nueva alternativa de generación eléctrica; que, en esencia aprovecha la energía rotacional al interior de un vórtice de superficie libre al introducir en su centro una turbina de eje vertical y de esta forma generar electricidad. Posteriormente, se han realizado diversos estudios del comportamiento de los vórtices libres inducidos en este tipo de centrales, así como también otras investigaciones que involucran la interacción del vórtice con la turbina vertical. Entre los principales estudios, destacan la tesis doctoral de Mulligan (2015), la cual describe el comportamiento de vórtices de superficie libre con circulación fuerte y también menciona la formación de vórtices inducidos por una geometría específica; por otra parte Nishi & Inagaki (2017) hacen una comparación entre un modelo físico y numérico de este tipo de centrales, donde verifican la fiabilidad del método numérico al lograr validar sus resultados. Es importante destacar que Timilsina, Mulligan, & Bajracharya (2018) hacen una revisión de todas las investigaciones que se han realizado de esta tecnología y mencionan también las micro centrales existentes con sus características de flujo y potencia.

Dentro de las plantas mencionadas por Timilsina et al. (2018), se encuentra la micro central de vórtice gravitacional de la comunidad de Kadagaya, en Junín, Perú. Esta micro central se alimenta con el agua del río Pichanaki y de acuerdo con los fundadores y directores de la comunidad, Alzamora

Guzmán y Glasscock, autores del paper: *Design and construction of an off-grid gravitational vortex hydropower plant: A case study in rural Peru*, la planta de su comunidad puede producir alrededor de 3.3 kW.

Para este trabajo de investigación se ha tomado en cuenta la geometría de la micro central de Kadagaya, así como también todos los parámetros de funcionamiento detallados en el paper antes mencionado. Cabe mencionar que en el marco de esta investigación se ha realizado una visita a las instalaciones de la micro central y se ha visto directamente el comportamiento del agua y el funcionamiento de la planta. En la Fig.1 se muestra una imagen de la micro central.



Fig. 1: Vista de la micro central de generación hidroeléctrica de la comunidad de Kadagaya, Junín, Perú.

ECUACIONES DEL MODELO NUMÉRICO

Para este estudio se usó el programa de modelación numérica Ansys CFX v19. La licencia para el uso del software fue proporcionada por la Universidad de Piura, que ha trabajado en el campo de modelado numérico desde el año 2008.

Para todos los fluidos, las principales ecuaciones que resuelve Ansys son: la ecuación de conservación de la masa y la ecuación de conservación del momentum. La ecuación de conservación de la masa puede ser escrita de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

Del mismo modo, se puede escribir la ecuación de conservación del momentum:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

En esta segunda ecuación, el término $\bar{\bar{\tau}}$ hace referencia al tensor de esfuerzos, el cual está dado por la siguiente expresión:

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3)$$

Una vez señaladas las ecuaciones que usa el modelo numérico, se procederá a describir el proceso de modelado.

MODELADO NUMÉRICO

El primer objetivo de este trabajo fue modelar el comportamiento del vórtice gravitacional en la micro central de forma aislada, con esto se logró estimar las velocidades que hay en el centro del vórtice y el comportamiento que tiene el fluido dentro de él; por otro lado, una vez hecho esto, se procedió a incorporar la turbina vertical en el centro del vórtice, de esta manera se comprobó que el giro de la turbina se encuentra en sintonía con el movimiento del agua en el vórtice. Todos los análisis se hicieron con la escala real de la micro central de Kadagaya.

Se empezó definiendo la geometría del dominio para la primera fase de la simulación numérica, la cual fue proporcionada por los encargados de la planta de Kadagaya, y consta de un canal trapezoidal principal de 1 metro en la base, 2.5 metros en su lado mayor y 1.5 metros de altura; después viene una transición de 1.5 metros de largo que une la geometría del canal principal con el canal de entrada a la boca del tanque circular. El canal de entrada cuenta con un ancho de 1.7 metros, una altura de 1.5 metros y 3 metros de largo desde el final de la transición hasta la zona no tangente del tanque. El tanque no es de sección circular, el ancho en la dirección paralela al canal es de 5.5 metros, y la dirección perpendicular cuenta con 5.75 metros; además, alberga un orificio de salida con diámetro de 1.05 metros. Para delimitar el modelo, se ha tomado una porción de 6 metros de canal principal con el fin de que el fluido se pueda desarrollar. La Fig.2 muestra el esquema en 3D del modelo geométrico, así como sus dimensiones.

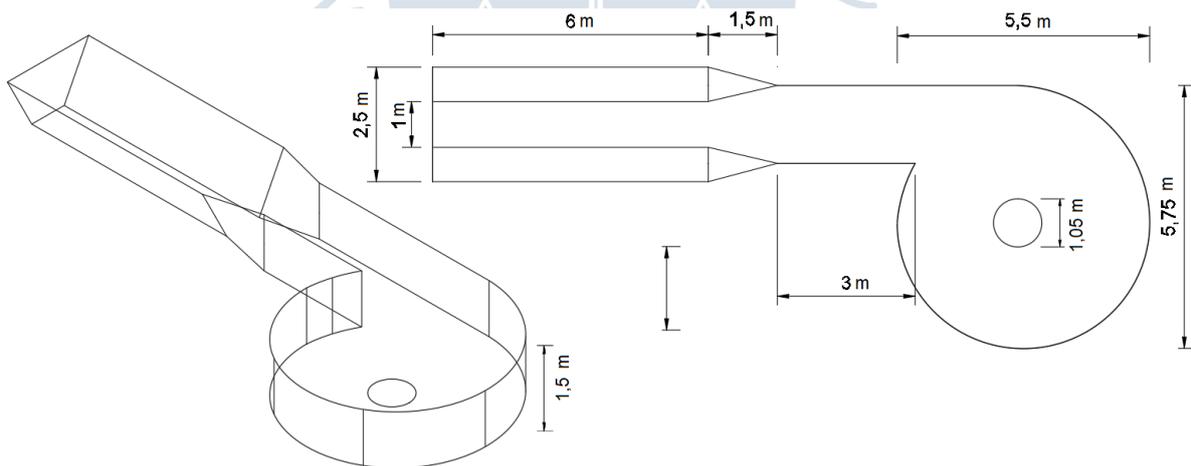


Fig.2. Esquema 3D del modelo geométrico de la micro central de Kadagaya

Con la geometría definida, se prosiguió a efectuar el mallado del dominio, el cual contó con 6 480 226 elementos. Se usó la configuración curvatura, cuyos elementos contaban con las siguientes características: tamaño mínimo de 2cm, la tasa de crecimiento 1.2, el tamaño máximo de la cara es de 4 cm y de los tetraedros de 4.5 cm. Los parámetros de calidad son 0.79 para ortogonalidad y 1.79 para la relación de aspecto.

Terminado el mallado, se pasó a establecer el *setup*, para así, determinar las condiciones de frontera de este primer caso. Dichas condiciones siguieron los estándares de flujos en canales abiertos, proporcionados por *Ansys documentation* (Ansys, 2015); por otro lado, la información de nivel de altura de agua y velocidad de flujo se obtuvo del paper de los directores de la comunidad de Kadagaya. Las condiciones de frontera serán descritas a continuación:

Primero se crearon las expresiones $UpH=1.35 [m]$, $UpVFAir=step((y-UpH) / 1 [m])$ y $UpVFWater=y-UpVFAir$. La primera denota el nivel de la superficie libre en la geometría; las otras sirven para definir la fracción de volumen de agua y aire en la entrada del volumen de control del canal tomado para la simulación. Después se definieron los fluidos aire y agua, con un vector buoyancy $(0; -9.81; 0) [m s^{-2}]$ y una densidad de referencia de $1.185 kg m^{-3}$.

A continuación, se escogió el modelo de turbulencia K-Épsilon y el modelo homogéneo de fluidos multifásicos, sin transferencia de calor.

La condición de ingreso o inlet se estableció en la cara trapezoidal al inicio del canal principal; la velocidad normal de ingreso es de $0.45 m/s$; posteriormente para definir la fracción de volumen del aire a la entrada se ingresó la expresión $UpVFAir$; y, para el agua $UpVFWater$.

La cara superior que encierra al dominio se consideró como opening. Del mismo modo, el orificio de salida del tanque, ubicado en la parte inferior, tiene la misma condición. Ambas caras empiezan con una fracción de volumen de aire de 1 y fracción de volumen de agua 0.

El resto de las caras del dominio se consideraron como paredes lisas.

El tipo de análisis fue transitorio, el tiempo total de 110 segundos y un paso de $0.5 s$ (10 iteraciones por paso). En el control de salida se decidió guardar los resultados en cada paso del tiempo establecido.

El dominio tuvo una condición de inicialización con velocidades de $(0; 0.45; 0) m/s$, presión relativa $0 Pa$, la fracción de volumen de aire inicial fue de 0 y 1 para la fracción de volumen de agua. Es bueno mencionar que se ha optado por esta disposición debido a que el vórtice se estabiliza más rápido con el dominio lleno de agua.

Para iniciar la solución se emplearon 28 núcleos computacionales en una distribución local paralela, además se consideró doble precisión. La Fig. 3 muestra al dominio con todas las condiciones de frontera aplicadas.

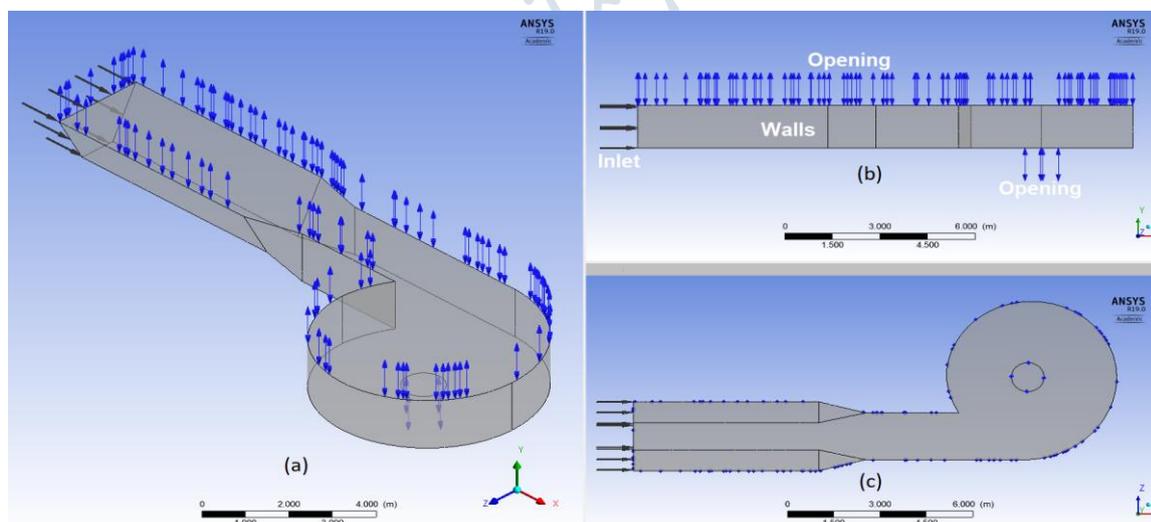


Fig.3 (a) Condiciones de frontera en el dominio (b) Vista lateral del dominio (c) Vista inferior del dominio

Como segundo objetivo, se elaboró la geometría de la estructura hidráulica en conjunto con la turbina vertical. Dicha turbina tiene 1.15 m de diámetro, 0.9 m de alto, cuenta con 16 palas; y, el ángulo entre la tangente de la turbina con la tangente exterior de las palas es 16° en su intersección; estas características están descritas en el estudio hecho por la comunidad de Kadagaya, el ancho de los alabes se ha considerado de 1 cm para facilitar el mallado. La turbina se ha inscrito y sustraído dentro de un cilindro de diámetro 1.2 m; con, 2 cm más desde altura de la parte superior y 3 cm más desde la parte inferior, como resultado se tiene un cilindro ligeramente más grande al que se le ha sustraído el volumen de la turbina. Debido a que la turbina está ubicada a 7 cm del fondo del tanque, este nuevo dominio lo estará a 4 cm, ya que tiene 3 cm de más en el fondo. Cabe mencionar que este método para modelar el comportamiento del flujo con la turbina fue consultado a los creadores del software usado, quienes recomendaron analizar el fenómeno mediante el mismo método empleado en otras máquinas hidráulicas. La Fig.4 muestra el esquema en 3D del modelo geométrico, el cilindro de la turbina vertical y ambas geometrías acopladas.

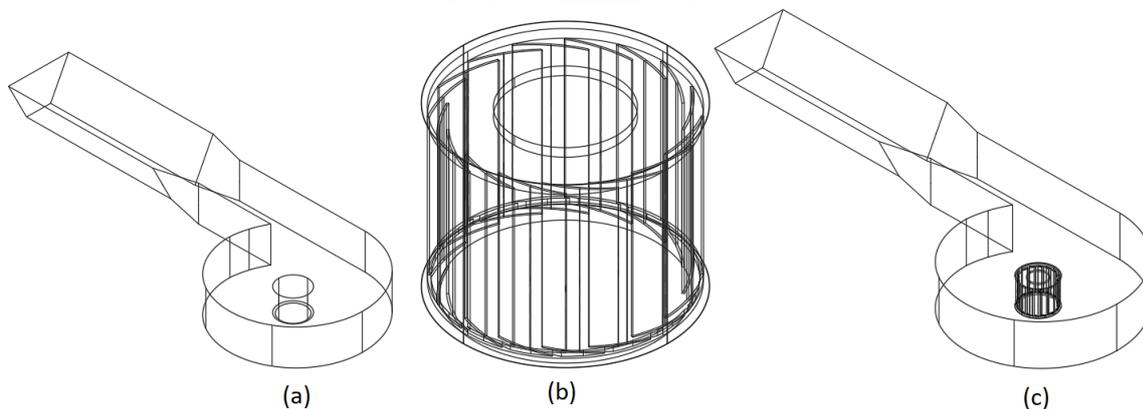


Fig.4 (a) Esquema 3D de la geometría del tanque con el volumen del cilindro sustraído, (b) Detalles de la turbina, (c) Modelo completo y acoplado de la micro central de Kadagaya

En esta ocasión se cuenta con 6 505 692 elementos. Se usó la configuración curvatura, cuyos elementos contaban con las siguientes características: tamaño mínimo de 1 cm, la tasa de crecimiento 1.2, el tamaño máximo de la cara es de 4 cm y de los tetraedros de 4.5 cm. Los parámetros de calidad son 0.79 para ortogonalidad y 1.80 para la relación de aspecto. Para este caso solo se ha reducido el tamaño mínimo de los elementos ya que se tienen que ajustar a la geometría del dominio de la turbina, la cual posee alabes de 1 cm.

Posteriormente se procedió a ingresar las condiciones de frontera en el *setup*, las cuales en su mayoría fueron las mismas que en el primer análisis, pero se realizaron algunos cambios y añadieron otras propiedades. Las nuevas configuraciones son las siguientes:

El dominio de la turbina fue un dominio rotativo y se le asignó un valor de 55 rpm de acuerdo con lo observado y posteriormente publicado en el artículo de la comunidad de Kadagaya.

Tanto las 3 caras del cilindro sustraído de la geometría principal, como las 3 del cilindro que contiene a la turbina forman 3 interfaces de conexión general de tipo rotor-estator transitorio.

Las condiciones iniciales del dominio de la turbina fueron: velocidad 0 m/s en todas las direcciones y un inicio estático. La presión relativa dentro de este dominio también fue 0 Pa, el volumen de fracción de agua será 1 y en consecuencia el del aire será 0.

La Fig. 5 detalla el *set up* de este segundo caso. Para este análisis se ha considerado un tiempo y paso similar al de la simulación anterior. De igual manera para la solución se emplearon 28 núcleos computacionales en una distribución local paralela, además también se consideró doble precisión.

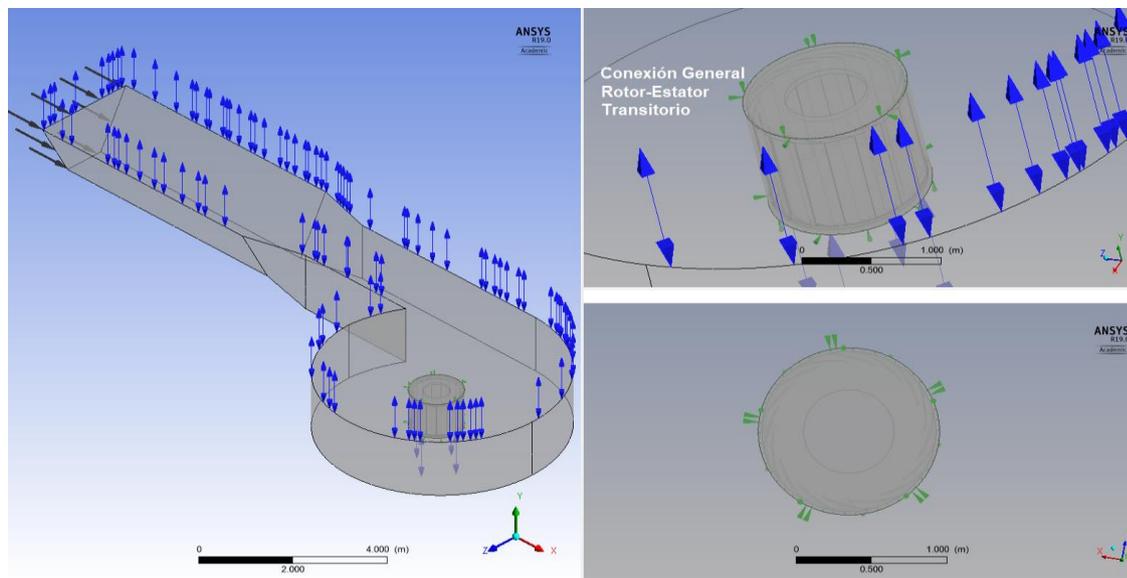


Fig. 5 Detalle del *set up* de la estructura hidráulica con la turbina acoplada

Una vez acabada la ejecución del solucionador, se procedió a estudiar los datos obtenidos en ambos casos.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se analizó el primer caso, del vórtice en giro libre, para lo cual se optó por usar una *isosurface* con un valor de 0.5 para la fracción de volumen de agua; a la superficie se le asignaron los valores de velocidad del agua en un rango local, obtenidos en la simulación. El resultado se puede ver en la Fig. 6.

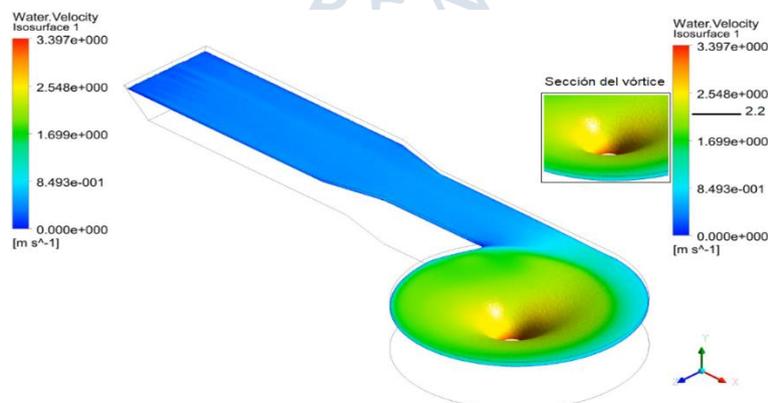


Fig.6 *Isosurface* del espejo de agua en el vórtice formado en geometría de la planta

La Fig. 6 además de mostrar la velocidad que tiene el agua en toda la superficie, también presenta una sección del vórtice donde la velocidad empieza a aumentar hasta llegar al orificio de salida. Al observar

detenidamente se aprecia, mediante la coloración, que la velocidad dentro del vórtice experimenta un crecimiento más rápido desde la zona donde su magnitud es de 2.2 m/s.

Es clave percibir en la misma Fig. 6 que la altura del espejo agua se encuentra al mismo nivel que la condición de frontera a la entrada, especificada en el *setup*; esto quiere decir que el resultado de la modelación concuerda con lo descrito por la comunidad de Kadagaya; lo cual es una buena señal puesto que la representación numérica al ajustarse al fenómeno real.

Para observar las velocidades al interior del fluido, se decidió incluir líneas de corriente en el dominio, a fin de apreciar que tanto cambia la velocidad del agua por debajo de la superficie con respecto al espejo de agua. En total son 75 líneas de corriente de agua, que inician en la sección de entrada de flujo en la dirección hacia delante, las líneas también cuentan con coloración para evidenciar el rango de variación de las velocidades. La Fig. 7 muestra las líneas de corriente en el dominio.

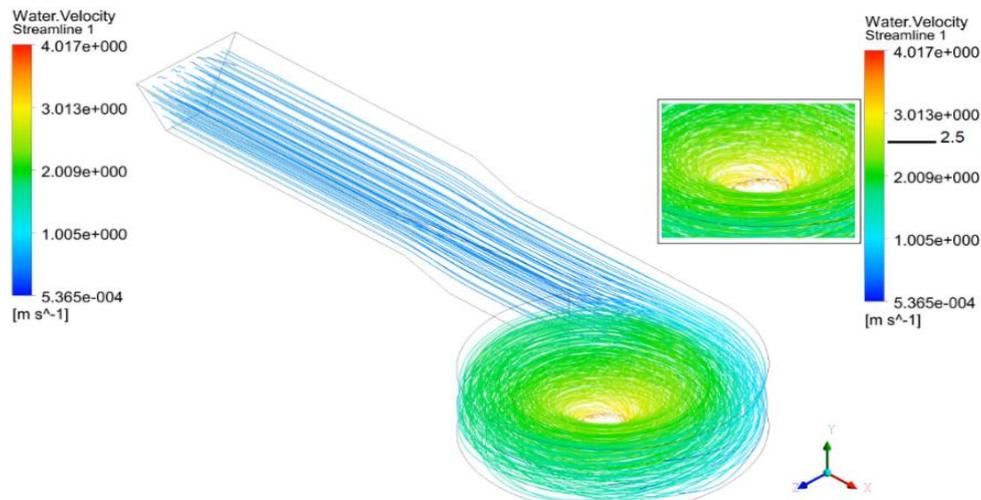


Fig. 7 Líneas de corriente en el vórtice gravitacional formado en la estructura hidráulica

Posteriormente se graficó un plano XY que atraviesa la sección del canal principal por la mitad, de este plano se pudo obtener la distribución de velocidades en el canal y en una sección del tanque. La Fig. 8 exhibe lo mencionado.

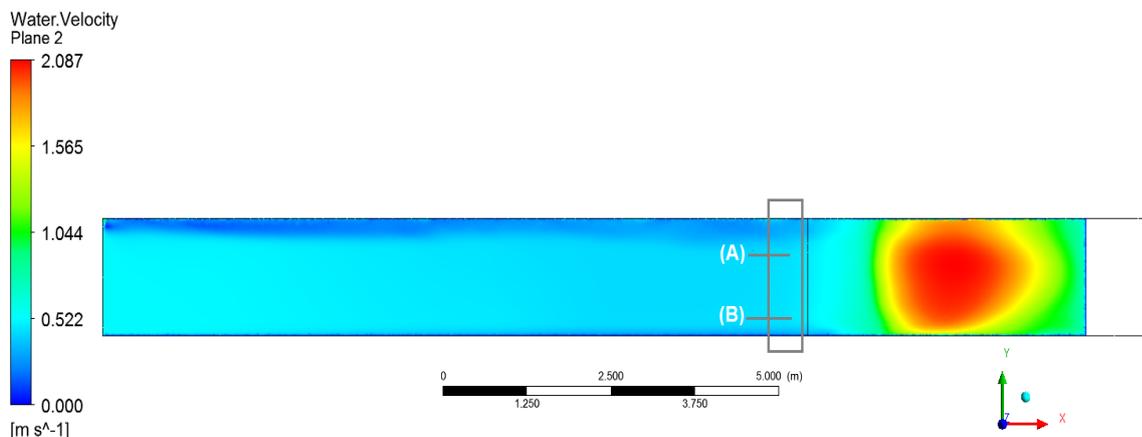


Fig. 8 Perfil de velocidades en el centro del canal

En la visita que se realizó a la planta de Kadagaya, se tomaron algunas mediciones de la velocidad de agua; sin embargo, al momento de realizar estas mediciones, el nivel del agua no se encontraba a la altura del nivel de operación especificado en el paper por directores de la comunidad; sino que, era de aproximadamente 1 metro. Bajo esta condición se procedió a tomar medidas. Desde el espejo de agua 20 cm hacia abajo, se logró obtener entre 0.5 y 0.6 m/s; posteriormente se midió la velocidad del flujo a 80 cm por debajo del espejo, lo cual resultó entre 0.3 y 0.4 m/s. Si se observa la Fig. 8 en la periferia de la marcación A, ubicada cerca a la primera medición, se ve que la velocidad está en el rango de 0.45 a 0.55 m/s; de la misma manera, en la marcación B, cerca al fondo, se distingue que la velocidad se torna menor, tomando un valor de aproximadamente 0.35 m/s.

El correntómetro usado para las mediciones fue un Gloval Water FP-111, con certificado de calibración de Tech Perú Industrial S.A.C. Dicho equipo mide velocidades con una precisión de una décima.

También se ha creído conveniente ver la forma de la superficie libre del tiene el vórtice, para esto se ha plasmado la fracción de volumen de agua en 2 planos que cruzan el centro el orificio de salida, esto se puede apreciar en la Fig. 9.

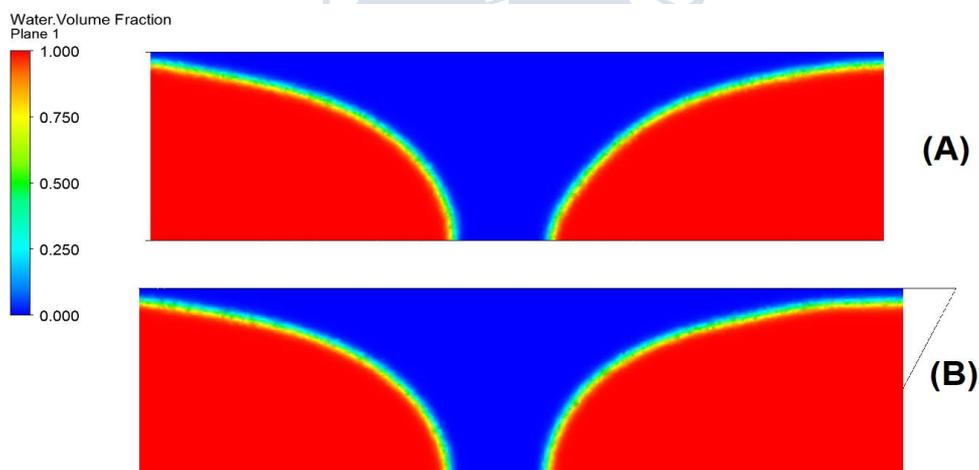


Fig. 9 La sección (A) muestra el perfil del centro del vórtice en un plano paralelo al canal principal, por otro lado, la sección (B) exhibe el perfil en un plano perpendicular al canal principal.

Al observar la Fig. 9 se puede afirmar que la forma de la superficie del vórtice simulado concuerda con la forma de un vórtice gravitacional de superficie libre, con circulación fuerte, el cual fue inducido por la forma de la geometría de la micro central.

Ahora se pasará a analizar los resultados obtenidos en el segundo caso, de la estructura hidráulica acoplada con la turbina. La Fig. 10 presenta el resultado del modelo numérico al que se la añadió una *isosurface* (similar a la del primer caso) para visualizar el espejo de agua.

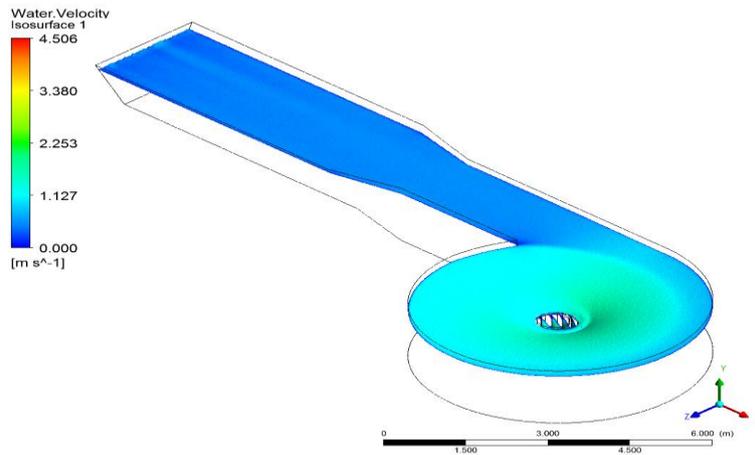


Fig. 10 *Isosurface* del modelo completo de la micro central.

La Fig. 10 deja entrever que la velocidad superficial del agua se ha reducido con relación a la velocidad presentada en el primer caso, el cual no contaba con la turbina. La pérdida de velocidad se debe a que la turbina genera una resistencia al giro libre del agua, tal cual como en el fenómeno real. Por otro lado, la coloración que representa la magnitud de la velocidad se ve en armonía a lo largo de la *isosurface*, lo que indica correlación entre el movimiento del agua y el de la turbina. Para apreciar mejor esto la Fig. 11 muestra en detalle el paso del agua a través de los alabes.

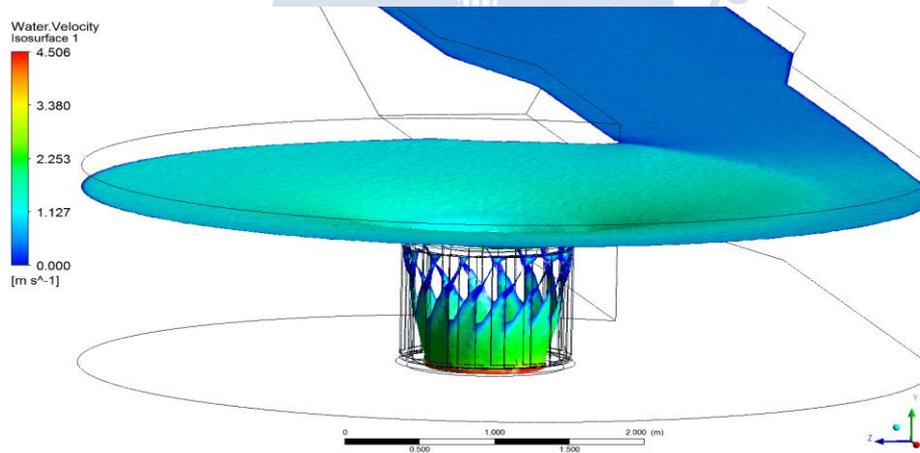


Fig.11 Detalle del paso del agua a través de la turbina.

Como fue presentado en la Fig. 11, el ingreso del agua a través de la turbina sigue la dirección de movimiento de las partículas en el vórtice (en este caso de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha si se sigue el flujo del agua); sin embargo, también se puede notar que dentro de la turbina, la velocidad del agua es mayor que en la zona superficial, la razón es que a pesar del obstáculo que representa la turbina, el agua mantiene la tendencia de formar el vórtice y por ende, la velocidad aumenta mientras más se acerca al centro.

Ya se ha visto la sintonía en velocidad que existe entre el vórtice y la turbina, pero para observar detalladamente este comportamiento, la Fig. 12 muestra la velocidad del agua en diferentes planos desde el fondo de la micro central.

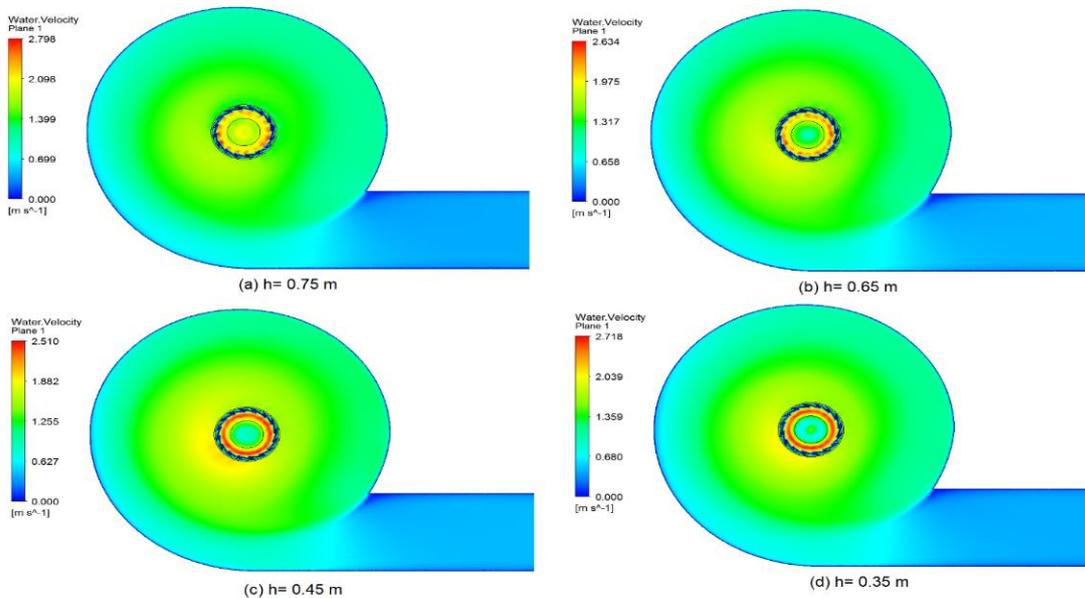


Fig. 12 Comparación del campo de velocidad del agua en planos de diferentes alturas con respecto al fondo del dominio de la micro central.

La Fig. 12 revela que hay correlación en los campos de velocidad en todos los planos analizados, siempre la velocidad crece mientras se acerca más al centro del vórtice. Asimismo, se llega a notar como el centro del orificio posee la velocidad más alta en cada caso, y va de forma gradual del plano más elevado al más inferior; esto concuerda con el fenómeno real.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados conseguidos y mostrados anteriormente, se puede concluir que: 1) La modelación numérica permite estimar con gran similitud las características que posee un vórtice formado en este tipo de centrales; del mismo modo, hace posible visibilizar el comportamiento del vórtice cuando se incluye la turbina vertical; en ambos casos, con un buen margen de similitud a la realidad. Por eso, preparar un modelo numérico facilitaría el estudio de este tipo de centrales en cuanto a la obtención de resultados cualitativos en una primera fase de desarrollo; 2) al incluir en la modelación el dominio rotacional de la turbina, se obtuvo una mejor apreciación de funcionamiento de este tipo de centrales, además de permitir recopilar datos interesantes sobre el comportamiento del flujo, como la forma en la que el agua ingresa por los álabes; 3) debido a que el proceso de desarrollo y diseño de este tipo de centrales aún está en evolución, siempre es recomendable afianzar los datos obtenidos en este tipo de simulaciones, en este caso la visita realizada sirvió para corroborar la magnitud de velocidad que puede tener el agua; del mismo modo, la información proporcionada por el artículo de la comunidad fue vital para comprobar que la altura del agua obtenida en la simulación era la correcta; esta información valida la simulación realizada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores extienden su gratitud a la comunidad de Kadagaya en Junín, Perú; por brindar toda la información que se requirió para completar este estudio. Del mismo al Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura por su asesoramiento en esta investigación; así como a la sección de energía de la Universidad de Piura por permitir usar su laboratorio de computación. Finalmente se agradece a la constructora HEGASA S.A.C por financiar el alquiler del correntómetro usado.

REFERENCIAS

- Alzamora Guzmán, V. J., Glasscock, J. A., & Whitehouse, F. (2019). Design and construction of an off-grid gravitational vortex hydropower plant: A case study in rural Peru. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 35, 131–138. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2019.06.004>
- Amaia Ormaetxea. (2019). América Latina duplicará su demanda de electricidad en veinte años | Expansión. Recuperado el 4 de septiembre de 2019, de 21 Enero website: <https://www.expansion.com/latinoamerica/iberoamericana-empresarial/2019/01/21/5c4481fb268e3e686c8b45eb.html>
- Ansys. (2015). *Ansys CFX Tutorials* (16a ed.). Canonsburg.
- Ansys, I. (2011). *ANSYS FLUENT Theory Guide* (14.0). Canonsburg.
- Barreto, C. (2016). *Investigación hidráulica utilizando un modelo numérico 3D de la presa Tablonos Alto – Chinecas*. (Tesis de pregrado en Ingeniería Civil). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.
- CFD NINJA. (2014). (25) Hydraulic Part 7/7 - ANSYS CFX Spillway - CFD Simulation - YouTube. Recuperado el 29 de noviembre de 2019, de <https://www.youtube.com/watch?v=DLM9dF-m4zs>
- Chung, T. J. (2010). *Computational Fluid Dynamics* (2nd ed.). New York.
- Dixon, S. L., & Hall, C. A. (2014). Hydraulic Turbines. *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*, 361–418. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415954-9.00009-7>
- EERE. (2017). Types of Hydropower Plants | Department of Energy. Recuperado el 29 de abril de 2019, de <https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants>
- EnergyFive. (2018). What is Hydroelectric Power Plant? How Does It Work? | Energy Five. Recuperado el 22 de mayo de 2019, de <https://energyfive.net/2018/02/05/what-is-hydroelectric-power-plant/>
- Enthusio. (2019). Gravitation Water Vortex Power Plant. Recuperado el 1 de junio de 2019, de <http://enthusio.com/product/624/Gravitation-Water-Vortex-Power-Plant>
- Indiamart. (2016). 10000 Watts Solar Power Plant at Rs 900000 /set(s) | Solar Power Plants | ID: 12856379848. Recuperado el 23 de mayo de 2019, de <https://www.indiamart.com/proddetail/10000-watts-solar-power-plant-12856379848.html>
- Jarabo, F., Perez, C., Elortegui, N., Fernandez, J., & Macias, J. J. (1988). *El Libro de las Energías Renovables* (Primera ed). Madrid.
- Juárez, J. D. (1992). *Centrales Hidroeléctricas* (Primera ed). Azcapotzalco.
- Kaltschmitt, M., Streicher, W., & Wiese, A. (Eds.). (2007). *Renewable Energy* (First edit). <https://doi.org/10.1007/3-540-70949-5>

- Layton, J., & Gleim, S. (2017). Do Wind Turbines Cause Health Problems? | HowStuffWorks. Recuperado el 23 de mayo de 2019, de <https://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/wind-turbines-health.htm>
- Learning Engineering. (2013). (56) Kaplan Turbine Working and Design - YouTube. Recuperado el 29 de mayo de 2019, de <https://www.youtube.com/watch?v=0p03UTgpnDU&feature=share>
- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2020). *Principales indicadores del sector eléctrico a nivel nacional*. Lima.
- Möller, G. (2013). *Vortex-induced air entrainment rate at intakes*. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-009932182>
- Mulligan, S. (2015). *Experimental and Numerical Analysis of Three-Dimensional Free-Surface Turbulent Vortex Flows with Strong Circulation*. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/51065676.pdf>
- Munoz-Hernandez, G. A., Mansoor, S. P., & Jones, D. I. (2013). *Modelling and Controlling Hydropower Plants* (First edit). <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2291-3>
- Nishi, Y., & Inagaki, T. (2017). Performance and Flow Field of a Gravitation Vortex Type Water Turbine. *International Journal of Rotating Machinery*, 2017, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2017/2610508>
- Noblecilla, L. (2019). *Modelación numérica para determinar la orientación de una bifurcación en el Tramo B del Río Piura*. (Tesis para optar el título de Ingeniero Civil). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.
- Osinerg. (2012). Gerencia Adjunta de Regulación Tarifaria. Recuperado el 27 de mayo de 2019, de www.fise.gob.pe
- Pinterest. (2012). (17) Pinterest. Recuperado el 27 de mayo de 2019, de <https://www.pinterest.com/pin/402579654172246463/visual-search/?x=17&y=13&w=530&h=354>
- Powergenadvancement. (2016). Voith receives contract for 1000 MW Pakal Dul hydropower plant. Recuperado el 27 de mayo de 2019, de <https://www.powergenadvancement.com/news/voith-receives-contract-for-1000-mw-pakal-dul-hydropower-plant-in-india/>
- Pritchard, P. J., & Leylegian, J. C. (2011). *Fox and McDonald's Introduction to fluid mechanics*. (8th ed.). New York: John Wiley & Sons Inc.
- Publmetro. (2014). ¿Es buena la energía nuclear para el Perú? | Actualidad | Publmetro Peru. Recuperado el 23 de mayo de 2019, de <https://publmetro.pe/actualidad/noticia-buena-energia-nuclear-peru-28738>
- Revista Energía. (2016). China finaliza el mayor proyecto hidroeléctrico del mundo, las Tres Gargantas, tras 23 años de trabajos. Recuperado el 27 de mayo de 2019, de <https://www.revistaenergia.com/?p=8308>
- Ruiz, C. (2017). *Calibración hidráulica del desarenador San Gabán II analizando los modelos de turbulencia con TELEMAC - 3D*. (Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.
- SavRee 3D. (2019). (56) How Francis Reaction Turbines Work (Hydropower) - YouTube. Recuperado el 29 de mayo de 2019, de https://www.youtube.com/watch?v=skQNf5_61Ps
- Serkan, S. (2019). Multiphase Flow in CFD: Basics and Modeling | SimScale Blog. Recuperado el 3 de

noviembre de 2019, de 14 Marzo website: <https://www.simscale.com/blog/2017/12/multiphase-flow/>

Tamayo, J., Salvador, J., Vásquez, A., & Vilches, C. (2016). *La industria de la electricidad en el Perú* (Primera ed). Lima.

Timilsina, A. B., Mulligan, S., & Bajracharya, T. R. (2018). Water vortex hydropower technology: a state-of-the-art review of developmental trends. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(8), 1737–1760. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1589-0>

Tranter. (2019). Plate Efficiency Converts Maximum Geothermal Heat Into Electricity - Tranter. Recuperado el 23 de mayo de 2019, de <https://www.tranter.com/plate-efficiency-converts-maximum-geothermal-heat-into-electricity/>

Tu, J., Yeoh, G. H., & Liu, C. (2013). *Computational fluid dynamics: a practical approach*. Elsevier/Butterworth-Heinemann.

Voith Hydro. (2016). (56) Pelton turbines - YouTube. Recuperado el 29 de mayo de 2019, de <https://www.youtube.com/watch?v=3PoeMQeHePo>



Conclusiones

- La modelación numérica de la formación del vórtice gravitacional ofrece una ventana al entendimiento de lo que ocurre dentro del vórtice y a sus alrededores. Mediante el uso de líneas de corriente y una escala de colores es posible identificar las zonas de mayor velocidad y las regiones donde la tasa de crecimiento de su magnitud es mayor.
- Al incluir el rotor de la turbina vertical en la simulación se pudo visualizar cómo es la superficie libre en la entrada al rotor de la turbina y de la magnitud de la velocidad en dicha superficie. La manera en la que el agua fluye a través de estos puede ser útil para mejorar futuros diseños de rotores de turbina.
- Las mediciones de velocidad registradas en la visita de campo a la micro central hidroeléctrica de Kadagaya brindan una corroboración indirecta, pues, aunque no fueron registradas al mismo tirante de la modelación, permiten tener una idea del margen de velocidades que debe tener la simulación. Debido a que los datos medidos guardan concordancia con los obtenidos en la simulación se puede afirmar que se puede utilizar la simulación numérica para ahondar en el estudio y entendimiento de esta tecnología (Página 59).
- Realizar simulaciones facilita el diseño de este tipo de micro centrales hidroeléctricas, pues se obtendrían resultados cualitativos en las fases de desarrollo, los cuales más tarde pueden ser afianzados por un modelo a escala con el que se pueda complementar la investigación.
- Se ha establecido un procedimiento para simular el flujo de una micro central de vórtice gravitatorio. Estudios posteriores deberán afinar los valores de los diferentes parámetros empleados en el software, así como considerar otros modelos de turbulencia y otros modelos para la interacción del agua con el aire para determinar si es posible lograr una modelación más fidedigna de este tipo de centrales. Así mismo, se debe utilizar una malla más fina en las zonas más críticas, como por ejemplo el espesor de los álabes. Estos detalles siempre se deben tomar en cuenta para que la simulación sea efectiva.

- Este tipo de centrales son ideales para las zonas alejadas de la red eléctrica principal, pues con pequeños caudales de agua pueden generar suficiente electricidad para pequeñas comunidades, y de esta forma suplir sus necesidades básicas. De esta manera también se fomenta el uso de fuentes eléctricas aisladas.



Recomendaciones

- Difundir esta nueva y emergente tecnología de generación, para que muchos más investigadores del área de producción de energía eléctrica puedan considerarla como una posible solución en sus proyectos.
- Es recomendable tener un modelo a escala o visitar las instalaciones de este tipo de centrales para poder conocer mejor su funcionamiento, y sobre todo ver el fenómeno en sí.
- Existen diversas formas de modelar este tipo de centrales de vórtice, como se mencionó, en este caso se le ha asignado la velocidad de rotación a la turbina (página 46), pero sería muy recomendable que se aborde un enfoque donde dicha velocidad de rotación sea un resultado de la simulación numérica (por acción de contacto con el fluido).
- En este caso la forma del tanque ha sido cilíndrica, sin embargo, otros estudios de esta tecnología sugieren que para optimizar el uso del caudal que circula por la micro central, se puede optar por un tanque con la forma de un cono truncado, el cual permitiría que el agua alcance mayores velocidades bajo las mismas condiciones de flujo, de esta manera se podría incrementar la producción de electricidad y la eficiencia de la micro central.
- El diseño de la turbina puede ser mejorado mediante la forma en la que el agua pasa a través de los alabes, el ángulo que forman las líneas de corriente del vórtice al momento de impactar con los alabes puede ser muy útil a la hora de diseñar estos elementos del rotor.
- Dentro del diseño de la planta, se deben considerar escapes para situaciones de avenida de caudales y sistemas de compuertas para poder regular el flujo dentro de la central, de este modo su operación no corre peligro. También se debe tomar en cuenta que las trampas, para evitar el ingreso de ramas o rocas, sean lo suficientemente amplias para que la vida acuática se desarrolle con normalidad.
- Para la toma de datos in-situ es recomendable buscar una forma de medir las velocidades dentro del vórtice. Con los correntómetros tradicionales es bastante complicado medir este parámetro, por eso solo se miden las velocidades a la entrada del tanque del vórtice.

- Finalmente, al ser una nueva tecnología, es fundamental estar al tanto del estado del arte de esta forma de generación, cada vez existen más investigaciones que aporten conocimiento al diseño, funcionamiento u optimización de este tipo de centrales.



Referencias bibliográficas

- Alzamora Guzmán, V. J., Glasscock, J. A., & Whitehouse, F. (2019). Design and construction of an off-grid gravitational vortex hydropower plant: A case study in rural Peru. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 35, 131–138. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2019.06.004>
- Amaia Ormaetxea. (2019). América Latina duplicará su demanda de electricidad en veinte años Expansión. Recuperado el 4 de septiembre de 2019, de 21 Enero website: <https://www.expansion.com/latinoamerica/iberoamericana-empresarial/2019/01/21/5c4481fb268e3e686c8b45eb.html>
- Ansys. (2015). *Ansys CFX Tutorials* (16a ed.). Canonsburg.
- Ansys, I. (2011). *Ansys Fluent Theory Guide* (14.0). Canonsburg.
- Barreto, C. (2016). *Investigación hidráulica utilizando un modelo numérico 3D de la presa Tablones Alto – Chinecas*. (Tesis de pregrado en Ingeniería Civil). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.
- Cfd ninja. (2014). (25) Hydraulic Part 7/7 - Ansys CFX Spillway - CFD Simulation - YouTube. Recuperado el 29 de noviembre de 2019, de <https://www.youtube.com/watch?v=DLM9dF-m4zs>
- Chung, T. J. (2010). *Computational Fluid Dynamics* (2nd ed.). New York.
- Dixon, S. L., & Hall, C. A. (2014). Hydraulic Turbines. *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*, 361–418. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415954-9.00009-7>
- EERE. (2017). Types of Hydropower Plants | Department of Energy. Recuperado el 29 de abril de 2019, de <https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants>
- EnergyFive. (2018). What is Hydroelectric Power Plant? How Does It Work? | Energy Five. Recuperado el 22 de mayo de 2019, de <https://energyfive.net/2018/02/05/what-is-hydroelectric-power-plant/>
- Enthusio. (2019). Gravitation Water Vortex Power Plant. Recuperado el 1 de junio de 2019, de <http://enthusio.com/product/624/Gravitation-Water-Vortex-Power-Plant>

- Indiamart. (2016). 10000 Watts Solar Power Plant at Rs 900000 /set(s) | Solar Power Plants | ID: 12856379848. Recuperado el 23 de mayo de 2019, de <https://www.indiamart.com/proddetail/10000-watts-solar-power-plant-12856379848.html>
- Jarabo, F., Perez, C., Elortegui, N., Fernandez, J., & Macias, J. J. (1988). *El Libro de las Energías Renovables* (Primera ed). Madrid.
- Juárez, J. D. (1992). *Centrales Hidroeléctricas* (Primera ed). Azcapotzalco.
- Kaltschmitt, M., Streicher, W., & Wiese, A. (Eds.). (2007). *Renewable Energy* (First edit). <https://doi.org/10.1007/3-540-70949-5>
- Layton, J., & Gleim, S. (2017). Do Wind Turbines Cause Health Problems? | HowStuffWorks. Recuperado el 23 de mayo de 2019, de <https://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/wind-turbines-health.htm>
- Learning Engineering. (2013). (56) Kaplan Turbine Working and Design - YouTube. Recuperado el 29 de mayo de 2019, de <https://www.youtube.com/watch?v=0p03UTgpnDU&feature=share>
- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2020). *Principales indicadores del sector eléctrico a nivel nacional*. Lima.
- Möller, G. (2013). *Vortex-induced air entrainment rate at intakes*. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-009932182>
- Mulligan, S. (2015). *Experimental and Numerical Analysis of Three-Dimensional Free-Surface Turbulent Vortex Flows with Strong Circulation*. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/51065676.pdf>
- Munoz-Hernandez, G. A., Mansoor, S. P., & Jones, D. I. (2013). *Modelling and Controlling Hydropower Plants* (First edit). <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2291-3>
- Nishi, Y., & Inagaki, T. (2017). Performance and Flow Field of a Gravitation Vortex Type Water Turbine. *International Journal of Rotating Machinery*, 2017, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2017/2610508>
- Noblecilla, L. (2019). *Modelación numérica para determinar la orientación de una bifurcación en el Tramo B del Río Piura*. (Tesis para optar el título de Ingeniero Civil). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.
- Osinerg. (2012). Gerencia Adjunta de Regulación Tarifaria. Recuperado el 27 de mayo de 2019, de www.fise.gob.pe
- Pinterest. (2012). (17) Pinterest. Recuperado el 27 de mayo de 2019, de <https://www.pinterest.com/pin/402579654172246463/visual-search/?x=17&y=13&w=530&h=354>

- Powergenadvancement. (2016). Voith receives contract for 1000 MW Pakal Dul hydropower plant. Recuperado el 27 de mayo de 2019, de <https://www.powergenadvancement.com/news/voith-receives-contract-for-1000-mw-pakal-dul-hydropower-plant-in-india/>
- Pritchard, P. J., & Leylegian, J. C. (2011). *Fox and McDonald's Introduction to fluid mechanics*. (8th ed.). New York: John Wiley & Sons Inc.
- Publimetro. (2014). ¿Es buena la energía nuclear para el Perú? | Actualidad | Publimetro Peru. Recuperado el 23 de mayo de 2019, de <https://publimetro.pe/actualidad/noticia-buena-energia-nuclear-peru-28738>
- Revista Energía. (2016). China finaliza el mayor proyecto hidroeléctrico del mundo, las Tres Gargantas, tras 23 años de trabajos. Recuperado el 27 de mayo de 2019, de <https://www.revistaenergia.com/?p=8308>
- Ruiz, C. (2017). *Calibración hidráulica del desarenador San Gabán II analizando los modelos de turbulencia con TELEMAC - 3D*. (Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.
- SavRee 3D. (2019). (56) How Francis Reaction Turbines Work (Hydropower) - YouTube. Recuperado el 29 de mayo de 2019, de https://www.youtube.com/watch?v=skQNf5_61Ps
- Serkan, S. (2019). Multiphase Flow in CFD: Basics and Modeling | SimScale Blog. Recuperado el 3 de noviembre de 2019, de 14 Marzo website: <https://www.simscale.com/blog/2017/12/multiphase-flow/>
- Tamayo, J., Salvador, J., Vásquez, A., & Vilches, C. (2016). *La industria de la electricidad en el Perú* (Primera ed). Lima.
- Timilsina, A. B., Mulligan, S., & Bajracharya, T. R. (2018). Water vortex hydropower technology: a state-of-the-art review of developmental trends. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(8), 1737–1760. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1589-0>
- Tranter. (2019). Plate Efficiency Converts Maximum Geothermal Heat Into Electricity - Tranter. Recuperado el 23 de mayo de 2019, de <https://www.tranter.com/plate-efficiency-converts-maximum-geothermal-heat-into-electricity/>
- Tu, J., Yeoh, G. H., & Liu, C. (2013). *Computational fluid dynamics : a practical approach*. Elsevier/Butterworth-Heinemann.
- Voith Hydro. (2016). (56) Pelton turbines - YouTube. Recuperado el 29 de mayo de 2019, de <https://www.youtube.com/watch?v=3PoeMQeHePo>